

А.В. Катещенок¹, І.М. Неклонський²

¹ Центр охорони праці і пожежно-технічного нагляду Служби безпеки України, Київ

² Національний університет цивільного захисту України, Харків

МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВИНИКНЕННЯ Й РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ПОЖЕЖІ У РАЗІ ДИВЕРСІЙ, ЩО ЗДІЙСНЮЮТЬСЯ ШЛЯХОМ ІНІЦІУВАННЯ ПОЖЕЖ НА ВАЖЛИВИХ ЕЛЕМЕНТАХ ОБ'ЄКТА БЕЗ ПРОНИКНЕННЯ НА ЙОГО ТЕРИТОРІЮ

Розроблена математична модель процесу виникнення й розповсюдження пожежі у разі диверсій, що здійснюються шляхом ініціювання пожеж на важливих елементах об'єкта без проникнення на його територію. Програмна реалізація даної моделі в системах підтримки прийняття рішень забезпечить командирів і штаби необхідними вхідними даними для проведення прогнозу та оцінювання наслідків застосування запалювальної зброї і подальшого прийняття рішення з організації взаємодії сил безпеки і оборони під час прикриття об'єктів від диверсійних дій противника.

Ключові слова: диверсія, запалювальна зброя, математичне моделювання, взаємодія сил охорони правопорядку.

Вступ

Постановка проблеми. В умовах сучасної військово-політичної обстановки актуальними загрозами національній безпеці України є розвідувально-підривна і диверсійна діяльність, дії, спрямовані на розпалювання сепаратизму і тероризму, тощо [1]. Тому, особливого значення набувають питання захисту об'єктів критичної інфраструктури від здійснення диверсій та терористичних актів. Серед таких об'єктів найбільшу небезпеку, з точки розу здійснення диверсій шляхом ініціювання пожеж на важливих елементах об'єкта без проникнення на його територію, представляють об'єкти, на яких виробляються та/або зберігаються озброєння, ракети, боеприпаси, вибухові речовини, вогнепальна зброя, спеціальні засоби, запаси пально-мастильних матеріалів, речового та продовольчого майна; вибухопожежонебезпечні об'єкти, які мають стратегічне значення для економіки і безпеки держави [2], ті, що належать до об'єктів підвищеної небезпеки тощо [3]. Використання відповідних об'єктів для досягнення головних цілей диверсійно-терористичних угруповань визначається вразливістю їх до зовнішніх впливів, а також наближеністю до місць проживання чи перебування населення та розташування військ, що спрощує реалізацію диверсійно-терористичних актів та ускладнює адекватну дію сил охорони правопорядку та відповідних служб. В таких умовах важливе значення набуває здатність органів управління проти диверсійних сил аналізувати можливість та наслідки застосування запалювальної зброї та інших засобів, застосування яких може спричинити виникнення пожежі на важливих елементах об'єкта без проникнення на його терито-

рію. Тому розроблення моделі процесу виникнення й розповсюдження пожежі у разі диверсій, що здійснюються шляхом ініціювання пожеж на важливих елементах об'єкта без проникнення на його територію є актуальним. Застосування даної моделі в системах підтримки прийняття рішення дало б можливість забезпечити командирів і штаби необхідними вхідними даними для проведення прогнозу та оцінювання наслідків застосування запалювальної зброї і подальшого прийняття рішення не тільки щодо захисту підрозділів від застосування противником запалювальної зброї а й щодо організації взаємодії сил безпеки і оборони з прикриття об'єктів від диверсійних дій противника.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі дослідження, перш за все, стосуються оцінювання ефективності застосування запалювальних боеприпасів артилерією, авіацією, ефективності застосування реактивних піхотних вогнететів тощо [4–7]. В їх основу покладено математичні моделі визначення ефективності ураження об'єкта (цілі), яка оцінюється за ступенем ураження цілі та ступенем зниження бойового потенціалу [5]. У зв'язку з цим, в якості основних елементів ураження, ураховуються два типи цілей: жива сила, що розташована відкрито на місцевості та в автомобілях; жива сила в бронетранспортерах (бойових машинах піхоти). Крім того, під час проведення розрахунків застосування запалювальних боеприпасів по площинних та групових цілях враховується лише такий вражаючий фактор, як вогнева дія, і не враховується фактор запалювальної дії [6].

Інші відомі методики прогнозування пожеж [8–9] ґрунтуються на визначенні геометричних та фізичних параметрів пожежі. Але в основу прогнозуван-

ня масштабів розвитку пожеж покладено модель процесу виникнення пожеж (в тому числі і масових), як наслідок застосування противником зброї масового ураження (ядерної зброї) [8].

Таким чином, відомі моделі процесу застосування запалювальної зброї, що лежать в основі розроблених методик, описують окремі складові даного процесу, а їх застосування не дає можливість описати процес виникнення й розповсюдження пожежі у разі диверсій, що здійснюються шляхом ініціювання пожеж на важливих елементах об'єкта без проникнення на його територію, як складний динамічний процес.

Про необхідність розроблення моделі, застосування якої дало б можливість забезпечити командирів і штаби необхідними вхідними даними для проведення прогнозу та оцінювання наслідків застосування запалювальної зброї зазначено в роботі [7]. Але запропонована в роботі модель теж має певні обмеження, так як описує процес виникнення й розповсюдження пожежі в природних екосистемах (лісових пожеж).

Метою статті є розроблення моделі процесу виникнення й розповсюдження пожежі у разі диверсій, що здійснюються шляхом ініціювання пожеж на важливих елементах об'єкта без проникнення на його територію.

Виклад основного матеріалу

Застосування запалювальної зброї ґрунтується на використанні запалювальних речовин та засобів доставки їх до цілі. Тому під час моделювання процесу виникнення й розповсюдження пожежі у разі здійснення диверсій доцільно провести його декомпозицію на дві складові: рух засобів доставки запалювальних речовин, ініціювання пожежі запалювальними речовинами та її розповсюдження.

Якщо розглядати рух засобів доставки запалювальних речовин як політ тіла, яке кинуте (запущене) під кутом до горизонту, то математичні моделі польоту будуть мати наступний вигляд.

Для польоту снаряда

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = -\frac{k_1 + k_2 \cdot \sqrt{v_x^2 + v_y^2}}{m} \cdot v_x; \\ \frac{dv_y}{dt} = -g - \frac{k_1 + k_2 \cdot \sqrt{v_x^2 + v_y^2}}{m} \cdot v_y; \\ \frac{dx}{dt} = v_x; \\ \frac{dy}{dt} = v_y, \end{cases} \quad (1)$$

де $k_1 = 6 \cdot \pi \cdot \mu$; $k_2 = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \rho}{r}$;

r – радіус снаряда; m – маса снаряда.

Для польоту запалювального пристрою

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v_x; \\ \frac{dv_x}{dt} = -\frac{F \cdot \cos T}{m}; \\ \frac{dy}{dt} = v_y; \\ \frac{dv_y}{dt} = -g - \frac{F \cdot \sin T}{m}; \\ F = C_x \cdot S_m \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}; \\ v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}; \\ \sin T = \frac{v_y}{v}; \\ \cos T = \frac{v_x}{v}; \end{cases} \quad (2)$$

$x(0) = 0$; $y(0) = 0$; $v_x(0) = v_0 \cdot \cos \phi_0$;

$v_y(0) = v_0 \cdot \sin \phi_0$,

де C_x – коефіцієнт сили опору повітря;

S_m – площа поперечного перетину об'єкта польоту, м²;

ρ – щільність повітря (1,225 кг/м³);

$$g = g_0 \cdot \frac{R^2}{(R + y)^2},$$

де g_0 – прискорення сили тяжіння на рівні моря;

R – радіус Землі.

Для опису поведінки засобів доставки запалювальних речовин доцільно ввести просторові та часові координати. Нехай $s = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ множина просторових координат, а вектор $s \in R^n$ має фіксовану розмірність n . Тоді рух об'єкта буде заданий залежністю $s = s(t)$, що розуміється як траєкторія руху тіла в просторі.

Будемо рахувати, що час спостереження t за положенням тіла в просторі являє собою $t \in [0; T]$, де $T = \infty$. Значення $s = s(t)$ у фіксований момент часу $t \in [0; T]$ називають станом або фазою об'єкта. Траєкторію руху часто називають фазою траєкторії, а координати вектора $s = s(t)$ – змінними стану об'єкта.

При цьому виділяють два особливих стани:

– початковий: $s = s(t) \Big|_{t=0} = s(0) = s_0$;

– кінцевий: $s = s(t) \Big|_{t=T} = s(T) = s_T$.

Розглянемо множину траєкторій, що визначаються початковим станом $s_0 \in S_0$. В цьому випадку просторові координати $s = s(t)$ заповнюють деякий

простір $s \in S_0$, який називають простором станів або фазовим простором об'єкту. Тоді зручно буде використовувати розширений фазовий вектор, в якому до змінних стану додається час $t \in T$ та розширений фазовий простір $S \times T$.

Таким чином, для тіла, яке кинуте (випущене) під кутом до горизонту фазовий вектор $s = s(t)$ містить чотири змінних $s_1 = x$; $s_2 = y$; $s_3 = \frac{dx}{dt}$; $s_4 = \frac{dy}{dt}$; $s = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$, значення яких належать до множини дійсних чисел R . Рух тіла відбувається безперервно $t \in R$.

Тоді поведінка об'єкта може бути описана за допомогою системи диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = 0; \\ \frac{d^2y}{dt^2} = -g, \end{cases} \quad (3)$$

$$x(0) = 0, y(0) = 0;$$

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = v_0 \cdot \cos \varphi_0, \quad \left. \frac{dy}{dt} \right|_{t=0} = v_0 \cdot \sin \varphi_0.$$

Рішення даної системи рівнянь для будь-якої початкової точки $s_0 = \left(x_0, y_0, \left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0}, \left. \frac{dy}{dt} \right|_{t=0} \right)$ означає безперервну фазову траєкторію $s(t)$.

Тепер стає можливим побудувати часові діаграми змінних станів: залежність координат тіла $x(t)$, $y(t)$ і швидкості $\frac{dx}{dt}(t)$, $\frac{dy}{dt}(t)$ від часу; фазову діаграму: залежність швидкості руху $\frac{dy}{dt}$ від координати $y - \frac{dy}{dt}(y)$.

На будь-якій фазовій траєкторії або часовій діаграмі можна вибрати окремі точки, які будуть цікавими з точки зору важливості для розуміння поведінки об'єкта – так звані особливі стани.

Дослідження руху об'єкта дозволяє фіксувати факт досягнення таких особливих точок. Як тільки об'єкт потрапляє в будь-яку особливу точку, ми стверджуємо, що відбулася подія.

Якщо позначити через E особливу точку, то подія – це ствердження того, що відповідна точка дося-

гла особливого стану $s(t) = E$. Подія буде характеризуватись часом її настання t' та її сутністю E .

Використовуючи такий підхід, будемо стверджувати, що для ініціювання пожежі на важливих елементах вибухопожежеобезпечного об'єкта засоби доставки запалювальних речовин мають досягти точки E , де відбудеться подія – виникнення пожежі. Тобто, дослідження процесу ініціювання пожежі запалювальними речовинами та її розповсюдження зводиться до визначення особливого стану $s(t) = E$, в якому відбувається запалювання горючого середовища.

В якості критерію запалювання доцільно використати величину теплового імпульсу, достатнього для загоряння горючої речовини:

$$I = q \cdot t, \quad (4)$$

де q – тепловий потік, кал/см²·с;

t – час дії теплового потоку, с.

Масштаб і щільність пожеж, що виникають і розвиваються на об'єктах та впливають на життєдіяльність населення і роботу об'єктів називають пожежною обстановкою [9–10].

Оцінку пожежної обстановки доцільно здійснювати за результатами прогнозування у такий спосіб: на плані об'єкта виділити ділянки забудови приблизно з однаковим ступенем вогнестійкості.

Кожній ділянці забудови привласнити порядковий номер. Нумерацію ділянок доцільно здійснювати від геометричного центру об'єкту за годинниковою стрілкою.

На підставі даних, що характеризують ділянки забудови за ступенем вогнестійкості, а також щільності забудови, визначається пожежне навантаження, що приведене до деревини. Для цього визначається щільність забудови:

$$P_3 = \frac{\sum S_{заб}}{S_{тер}} \cdot 100, \quad (5)$$

де $\sum S_{заб}$ – сума площ будівель і споруд (в плані);

$S_{тер}$ – площа території об'єкта.

Щільність забудови значно впливає на розвиток пожеж в забудові, тому що характеризується розташуванням будівель і споруд та відстанями між ними (табл. 1).

Таблиця 1

Середня відстань між будівлями і спорудами в залежності від щільності забудови

Щільність забудови, %	5	20	30	40	50	60
Відстань між будівлями L, м	100	50	30	22	12	8

Визначається питоме пожежне навантаження:

$$P_{\text{питг}} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i \cdot Q_i}{S}, \quad (6)$$

де m_i – маса горючої речовини або матеріалу, кг; Q_i – кількість тепла, що виділяється при згорянні 1 кг речовини, МДж/кг; S – площа пожежі, м²; n – кількість видів горючих матеріалів.

Для приведення до теплоти згорання деревини користуються формулою

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{питг}}}{Q_{\text{дер}}}, \quad (7)$$

де $Q_{\text{дер}}$ – теплота згорання деревини, яку слід приймати рівній 17 МДж/кг.

За величиною пожежного навантаження, що приведенне до деревини, на виділених ділянках забудови визначаються види можливих пожеж відповідно до табл. 2.

Таблиця 2

Види можливих пожеж

Величина приведенного пожежного навантаження $P_{\text{пр}}$, кг/м ²	Характеристика ділянок за видами можливих пожеж
до 50	Ділянки можливих окремих пожеж
51–100	Ділянки можливих суцільних пожеж
>100	Ділянки небезпечні щодо виникнення вогневого шторму

Крім того, складна пожежна обстановка, тобто суцільні пожежі можуть виникнути на ділянках, забудованих переважно:

- 1) будівлями і спорудами IV і V ступені вогнестійкості при щільності забудови не менше 15%;
- 2) будівлями і спорудами III ступені вогнестійкості при щільності забудови не менше 20%;
- 3) будівлями і спорудами I і II ступені вогнестійкості при щільності забудови не менше 30%.

Вогневі шторми можуть виникати на ділянках з щільністю забудови не менше 20% будівлями і спорудами III, IV, V ступені вогнестійкості. На інших ділянках забудови можуть виникнути окремі пожежі.

Можливість розповсюдження пожежі між суміжними виробничими будівлями визначається за умови $L < R_1 + R_2$, де L – відстань між суміжними палаючими будинками, м; R_1, R_2 – безпечні відстані між будівлями (від першої до другої, від другої до першої відповідно), м.

Безпечна відстань R визначають на основі законів передачі випромінювання [10] за формулою:

$$R = \sqrt{\frac{\psi_1 \cdot \psi_2 \cdot C_{\text{пр}} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{ф}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \cdot S_{\text{ф}}}{\pi \cdot q_{\text{доп}}}}, \quad (8)$$

де ψ_1, ψ_2 – умовні коефіцієнти опромінення, що визначаються найбільшими кутами між напрямком випромінювання і нормаллю до поверхні, що випромінює тепло по довжині факела α_r і по висоті α_{β} (рис. 1); $T_{\text{ф}}$ – середня температура полум'я, °C; T_1 – максимально допустима температура для суміжного об'єкта; $S_{\text{ф}}$ – площа проекції поверхні полум'я на площину, паралельну опромінюється пове-

рхні, м²; $q_{\text{доп}}$ – допустима інтенсивність опромінення, Вт/м²; $C_{\text{пр}}$ – приведений коефіцієнт випромінювання, який при практичних розрахунках можна прийняти рівним 4,65 Вт/м².

Для визначення коефіцієнтів ψ_1, ψ_2 потрібно, відповідно встановити найбільший кут між напрямком випромінювання і нормаллю до поверхні, що випромінює тепло: по довжині L_r і по висоті L_{β} факелу (рис. 1).

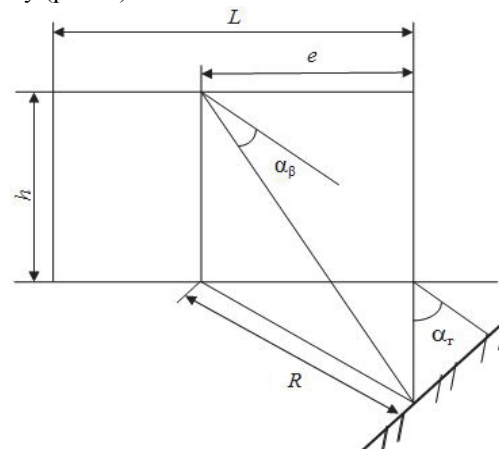


Рис. 1. Схема для визначення найбільших кутів напрямку випромінювання від поверхні полум'я

За знайденими кутами напрямку випромінювання L_r і за довідником визначається коефіцієнти ψ_1, ψ_2 . Для тих, що найбільш часто зустрічаються в практиці, складових $L_r = 45$ і $L_{\beta} = 10$, а також $L_r = 60$ і $L_{\beta} = 10$ і чисельне значення коефіцієнтів ψ_1, ψ_2 для інженерних розрахунків можна прийняти рівними: 0,7 і 0,98; 0,55 і 0,98 – відповідно.

Для визначення чисельних значень систем (1–2), що задають динаміку об'єкта, необхідно застосувати

комп'ютерне моделювання, що дозволить декілька раз чисельно вирішити систему рівнянь (1–2) та визначити точки падіння засобів доставки запалювальних речовин і після цього отримати потрібну залежність.

Для програмної реалізації математичної моделі доцільно застосувати відомі математичні пакети моделювання Mathcad, MATLAB, Maple. Приклад такого імітаційного моделювання динаміки руху засобу доставки запалювальної зброї представлений на рис. 2.

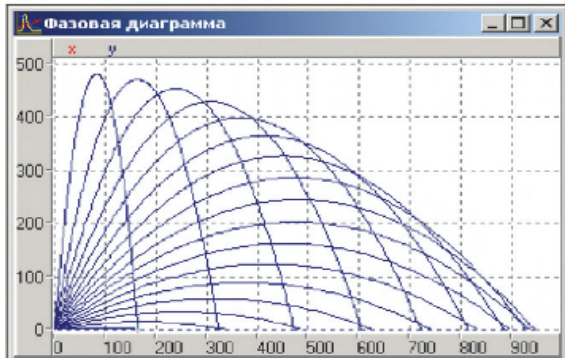


Рис. 2. Результати імітаційного моделювання

Висновки

Таким чином, розроблена математична модель процесу виникнення й розповсюдження пожежі у разі диверсій, що здійснюються шляхом ініціювання пожеж на важливих елементах об'єкта без проникнення на його територію. Програмна реалізація даної моделі в системах підтримки прийняття рішення забезпечить командирів і штаби необхідними входними даними для проведення прогнозу та оцінювання наслідків застосування запалювальної зброї і подальшого прийняття рішення з організації взаємодії сил безпеки і оборони під час прикриття об'єктів від диверсійних дій противника.

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОЖАРА В СЛУЧАЕ ДИВЕРСИЙ, СОВЕРШАЕМЫХ ПУТЕМ ИНИЦИИРОВАНИЯ ПОЖАРОВ НА ВАЖНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ОБЪЕКТА БЕЗ ПРОНИКНОВЕНИЯ НА ЕГО ТЕРРИТОРИЮ

А.В. Катещенко, І.М. Неклонський

Разработана математическая модель процесса возникновения и распространения пожара в случае диверсий, совершаемых путем инициирования пожаров на важных элементах объекта без проникновения на его территорию. Программная реализация данной модели в системах поддержки принятия решений обеспечит командиров и штабы необходимыми входными данными для проведения прогноза и оценки последствий применения зажигательного оружия и дальнейшего принятия решения по организации взаимодействия сил безопасности и обороны во время прикрития объектов от диверсионных действий противника.

Ключевые слова: диверсия, зажигательное оружие, математическое моделирование, взаимодействие сил охраны правопорядка.

MODEL OF ORIGIN AND DISTRIBUTION IN CASE OF FIRE SABOTAGE CARRIED OUT BY INITIATING FIRE ON AN IMPORTANT ELEMENT OF THE OBJECT WITHOUT PENETRATION ON ITS TERRITORY

A. Kateshchenok, I. Neklonskyi

The mathematical model of the emergence and spread of fire in case of sabotage carried out by initiating fires on important elements of an object without penetration into its territory. Software implementation of this model in decision support systems will provide commanders and staffs necessary input data for forecasting and evaluating the effects of incendiary weapons and the subsequent decision of the interaction of the forces of security and defense in the cover object of sabotage enemy operations.

Keywords: sabotage incendiary weapons, mathematical modeling, interaction of law enforcement forces.

Список літератури

1. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 6 травня 2015 року «Про Стратегію національної безпеки України» [Текст]: указ Президента України від 26 травня 2015 року № 287/2015 // Офіційний вісник Президента України. – 2015 р. – № 13. – 03 червня. – 50 с.
2. Про затвердження переліку підприємств, які мають стратегічне значення для економіки і безпеки держав [Текст]: постанова Кабінету Міністрів України від 04 березня 2015 року № 83.
3. Про об'єкти підвищеної небезпеки [Текст]: Закон України від 18.01.2001 № 2245-III // Офіційний вісник України. – 2001. – № 7. – 02 березня. – 96 с.
4. Грабовой И.Д. Зажигательное оружие и защита от него / И.Д. Грабовой, В.К. Кадюк. – М.: Военное издательство, 1983. – 141 с.
5. Теоретические основы управления огнем наземной артиллерии. – Ленинград: ВАА. Издание академии, 1978. – 454 с.
6. Матес Е.Н. Зажигательные средства авиации и защита от них: учеб. пособ. / Е.Н. Матес, Г.А. Шишкин. – К.: КВВАИУ, 1973. – 54 с.
7. Застосування авіації у бою та операції / В.І. Дюдин, В.В. Величко, О.І. Герасименко та ін. – К.: АЗСУ. Видання академії. – 1998. – 163 с.
8. Удосконалення системи державного управління забезпечення внутрішньої безпеки держави (заклучний, книга 4): звіт про НДР (шифр «Платформа») / Академія внутрішніх військ МВС України; кер. І.О. Кириченко. – ДР 0113U007109. – Х., 2014. – 171 с.
9. Депутат О.П. Цивільна оборона: навч. посіб. / О.П. Депутат, І.В. Коваленко, І.С. Мужик. – Львів: Афіша, 2000. – 332 с.
10. Стеблюк М.І. Цивільна оборона: підручн. / М.І. Стеблюк. – К.: Знання-Прес, 2003. – 455 с.
11. Рябова І.Б. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі: навч. посіб. / І.Б. Рябова, І.В. Сайчук, А.Я. Шаршанов. – Х.: АПБУ, 2002. – 355 с.

Надійшла до редколегії 13.01.2017

Рецензент: д-р техн. наук ст. наук. співробітник В.В. Тютюник, Національний університет цивільного захисту України, Харків.