

14. ДБН 360-92* Містобудування. Планування і забудова міських і сільських поселень. – К.: Укрархбудінформ, 1993. – 107с.;

15. Присяжнюк Л.А., Белку Д.Г. Основные направления научных исследований по проблемам пожарной безопасности в Украине // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: Мин. образования Украины, МВД Украины, 1993. – С. 15-19.

16. Нормы пожарной безопасности НПБ 101-95 РФ. – М.: ГУГПСМВД России, 1994. – 7 с.

УДК 641.84

А.Д.Кузик, к.ф.-м.н., доцент (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАЙМАННЯ ЛІСОВОЇ ПІДСТИЛКИ

Проводиться теоретичне дослідження процесу займання лісової підстилки під дією теплового потоку від джерела запалювання

Дослідженню поширення лісових пожеж присвячено низку робіт [1-5], у які ввійшли результати теоретичних, експериментальних досліджень та математичного моделювання. Відомі математичні моделі поширення пожежі базуються, як правило, на теорії рівнянь математичної фізики (найчастіше із використанням диференціального рівняння поширення тепла) та із застосуванням геометричних підходів (на основі градієнтних методів та за принципом Гюйгенса-Френеля). Результати, одержані при моделюванні, як видно з робіт, близькі до експериментальних. Проте практично всі моделі описують процес стійкого горіння, не розглядаючи детально початкові стадії виникнення та поширення пожежі. Але саме на початковій стадії є найбільша можливість незначними зусиллями запобігти виникненню пожежі або припинити її поширення. І тому моделювання процесів займання є актуальним та заслуговує на дослідження.

Найчастіше виникнення пожеж у лісах пов'язане з діяльністю людини. Так, лише з січня по жовтень 2005 року в Україні зафіксовано 4223 лісові пожежі, основними причинами виникнення яких (у 92% випадків) були порушення правил пожежної безпеки населенням, заготівельниками і підприємствами, і лише 8% пожеж виникли від ударів блискавки та сільськогосподарських палів [6]. Відомо, що пожежа найчастіше виникає від залишеного багаття, несправних технічних засобів. Але можливим є її виникнення і від недопалка сигарети чи сірника. При цьому пожежа розпочинається з займання лісової підстилки. Метою роботи є моделювання процесів займання лісової підстилки та її горіння на ранніх стадіях розвитку пожежі.

При створенні моделі будемо виходити з таких положень. Як джерело запалювання будемо розглядати полум'я сірника, багаття. Вважатимемо, що лісова підстилка сформована з однорідного матеріалу (листя, хвоя) або з суміші цих матеріалів. Товщину підстилки з листяних матеріалів будемо вважати невеликою (1-2 мм) та теплоізолюваною від поверхні ґрунту, оскільки, як правило, під верхнім шаром лежить шар решток, що перегнивають або перегнили. Для спрощення будемо розробляти модель для випадку відсутності вітру (розташування всередині лісу). Також вважатимемо, що полум'я, яке виникає та поширюється, має форму циліндричної поверхні з вертикальними твірними.

При займанні підстилки [7] можна виділити дві основні фази – висушування горючого матеріалу та нагрівання до температури займання (підігрів та піроліз). Зауважимо, що при

наявності матеріалу, багатого на смоли (хвоя, мох, тощо) є можливим займання і при нижчій температурі внаслідок наявності летких горючих елементів.

Дослідимо процес займання горизонтальної поверхні (підстилки). Будемо вважати, що джерело запалювання має форму циліндра радіуса r та висотою H (рис. 1). Основними факторами, які спричиняють виникнення горіння, є [8] теплопередача, теплове випромінювання та конвекція. Для розв'язування задачі в загальному вигляді потрібно врахування всіх них. Але оскільки повітря є поганим провідником тепла [9], а конвективні потоки спрямовані вгору та не можуть спричинити займання, зосередимо увагу на випромінюванні як найбільш істотному факторі.

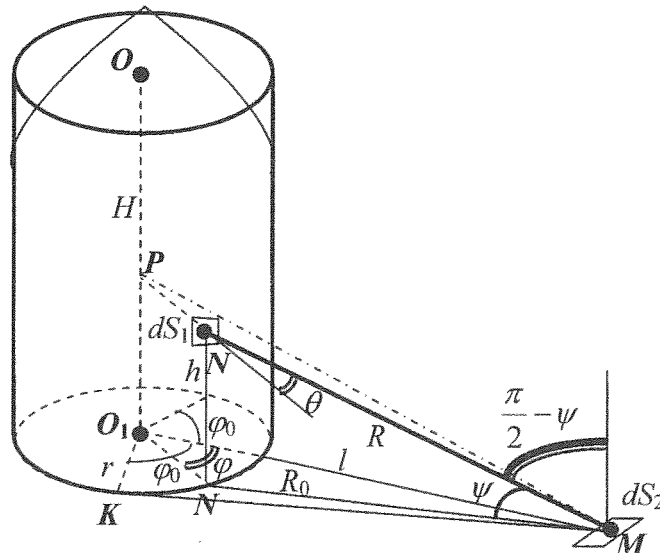


Рис. 1

Основною характеристикою джерела запалювання, що характеризує випромінювання, є тепловий потік Φ – кількість теплоти, яка проходить через одиницю площі за одиницю часу. За законом Ламберта інтенсивність випромінювання I поверхні одиничної площі під кутом θ до нормалі визначається за формулою

$$I = I_n \cos \theta, \quad (1)$$

де I_n – інтенсивність випромінювання по нормалі до поверхні одиничної площі. Величина I_n обчислюється як частка

$$I_n = \frac{E}{\pi},$$

де E – потужність випромінювання, яка пропорційна четвертому степеню абсолютної температури та обчислюється з закону Стефана-Больцмана

$$E = \varepsilon \sigma T^4,$$

у якому ε – відносна випромінювальна здатність, а σ – стала Стефана-Больцмана. Тоді елементарна поверхня dS_1 , розташована на висоті h від горизонтальної поверхні, випромінює на елементарну поверхню dS_2 тепловий потік $d\Phi$, який [8] обчислюється за формулою

$$d\Phi = I_n \cos \theta \cos \left(\frac{\pi}{2} - \psi \right) dS_2 d\omega, \quad (2)$$

де θ – кут між нормаллю до поверхні dS_1 та напрямком випромінювання (відрізок NM), ψ – кут між цим відрізком та горизонтальною поверхнею (відповідно, $\frac{\pi}{2} - \psi$ – кут між нормаллю

до поверхні dS_2 та напрямком випромінювання, а $d\omega$ – елементарний тілесний кут, під яким видно поверхню dS_1 з поверхні dS_2 та який обчислюється за формулою

$$d\omega = \frac{dS_1}{R^2}, \quad (3)$$

де R – відстань між серединами поверхонь (довжина відрізка NM).

Для визначення кутів у формулі (3) розглянемо відповідні трикутники. Так, у трикутнику MNP кут θ є зовнішнім кутом, який доповнює до π внутрішній кут PNM . Маємо: $NP=r$, $MN=R$. З трикутника MPO_1 за теоремою Піфагора $MP^2=h^2+(l+r)^2$. За теоремою косинусів для трикутника MNP

$$\cos(\pi - \theta) = \frac{PN^2 + NM^2 - PM^2}{2 \cdot PN \cdot NM},$$

звідки

$$\cos \theta = -\frac{r^2 + R^2 - h^2 - (l+r)^2}{2rR}. \quad (4)$$

Косинус кута $\frac{\pi}{2} - \psi$ визначимо для відповідного йому внутрішнього одностороннього кута N_1NM з прямокутного трикутника N_1NM . Маємо

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \psi\right) = \sin \psi = \frac{h}{R}. \quad (5)$$

Тоді (2) з урахуванням (3)-(5) перепишеться у вигляді

$$d\Phi = I_n \frac{h}{R} \frac{h^2 + (l+r)^2 - r^2 - R^2}{2rR} dS_2 \frac{dS_1}{R^2}. \quad (6)$$

Вважаючи dS_1 прямокутником з площею $rd\varphi dh$, де $d\varphi$ – приріст кута φ , утвореного між відрізками O_1N_1 та O_1M , dh – приріст висоти h , з (6) одержуємо

$$d\Phi = I_n \frac{h(h^2 + l^2 + 2rl - R^2)}{2R^4} d\varphi dh. \quad (7)$$

З трикутника MNN_1 за теоремою Піфагора маємо, що $R^2 = R_0^2 + h^2$, де $R_0=MN_1$. Тоді (7) перепишемо у вигляді

$$d\Phi = I_n \frac{h(l^2 + 2rl - R_0^2)}{2(R_0^2 + h^2)^2} d\varphi dh. \quad (8)$$

Оскільки тепловий потік – величина адитивна, для визначення сумарного теплового потоку, який падає на поверхню dS_2 , проінтегруємо (8) по частині бічної поверхні циліндра S_1 , яку видно з точки M :

$$\frac{d\Phi}{dS_2} = \iint_{S_1} I_n \frac{h(l^2 + 2rl - R_0^2)}{2(R_0^2 + h^2)^2} d\varphi dh. \quad (9)$$

Оскільки величина R_0 , яка з трикутника MN_1O_1 за теоремою косинусів дорівнює

$$R_0^2 = r^2 + (r+l)^2 - 2r(r+l)\cos\varphi, \quad (10)$$

не залежить від h , а S_1 визначається межами змінних $-\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_0$ та $0 \leq h \leq H$ то формулу (9) запишемо у вигляді

$$\frac{d\Phi}{dS_2} = \int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} d\varphi \int_0^H I_n \frac{h(l^2 + 2rl - R_0^2)}{2(R_0^2 + h^2)^2} dh.$$

Проінтегрувавши по h та вважаючи, що I_n не залежить від h , маємо

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi}{dS_2} &= \int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} I_n \frac{(l^2 + 2rl - R_0^2)}{4} \left(\frac{1}{R_0^2} - \frac{1}{R_0^2 + H^2} \right) d\varphi = \\ &= \int_0^{\varphi_0} I_n \frac{(l^2 + 2rl - R_0^2)H^2}{2R_0^2(R_0^2 + H^2)} d\varphi. \end{aligned}$$

Врахувавши (10), попереднє співвідношення запишемо у вигляді

$$\frac{d\Phi}{dS_2} = \int_0^{\varphi_0} I_n \frac{(2r(r+l) \cos \varphi - 2r^2)}{2(2r^2 + 2rl + l^2 - 2r(r+l) \cos \varphi)(2r^2 + 2rl + l^2 - 2r(r+l) \cos \varphi + H^2)} d\varphi.$$

Нехай $a = 2r(r+l)$ та $b = 2r^2 + 2rl + l^2$. Тоді останній інтеграл набуде вигляду

$$\frac{d\Phi}{dS_2} = \frac{I_n H^2}{2} \int_0^{\varphi_0} \frac{(a \cos \varphi - 2r^2)}{(b - a \cos \varphi)(b - a \cos \varphi + H^2)} d\varphi.$$

Застосувавши універсальну тригонометричну заміну $z = \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}$ та здійснивши розкладення на елементарні дроби, одержимо

$$\frac{d\Phi}{dS_2} = \frac{I_n H^2}{2} \left(2 \int_0^{\operatorname{tg} \varphi_0} \frac{Adz}{z^2 + \frac{b-a}{b+a}} d\varphi + 2 \int_0^{\operatorname{tg} \varphi_0} \frac{Bdz}{z^2 + \frac{b-a+H^2}{b+a+H^2}} d\varphi \right), \quad (11)$$

де

$$A = \frac{-4r^2 + 2b}{2H^2(b+a)}, \quad B = \frac{4r^2 - 2H^2 - 2b}{2H^2(b+a+H^2)}.$$

Оскільки при $l > 0$

$$\frac{b-a}{b+a} = \left(\frac{l}{2r+l} \right)^2 > 0$$

і

рівність (11) набуде вигляду $\frac{b-a+H^2}{b+a+H^2} = \frac{l^2+H^2}{(2r+l)^2+H^2} > 0$,

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi}{dS_2} &= I_n \left(\frac{-4r^2 + 2(2rl + 2r^2 + l^2)}{l(2r+l)} \operatorname{arctg} \left(\operatorname{tg} \varphi_0 \frac{2r+l}{l} \right) + \right. \\ &\left. + \frac{4r^2 - 2H^2 - 2(2rl + 2r^2 + l^2)}{\sqrt{(l^2 + H^2)((2r+l)^2 + H^2)}} \operatorname{arctg} \left(\operatorname{tg} \varphi_0 \sqrt{\frac{(2r+l)^2 + H^2}{l^2 + H^2}} \right) \right). \end{aligned}$$

Значення φ_0 обчислюємо з прямокутного трикутника O_1MK , у якому $\cos \varphi_0 = \frac{r}{r+l}$. Тоді

$$\operatorname{tg}^2 \frac{\varphi_0}{2} = \frac{l}{2r+l}, \text{ а}$$

$$\frac{d\Phi}{dS_2} = I_n \left(2 \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{2r+l}{l}} - 2 \frac{H^2 + 2rl + l^2}{\sqrt{(l^2 + H^2)((2r+l)^2 + H^2)}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1 + \frac{4r^2 + 4rl}{l^2 + H^2}}{1 + \frac{2r}{l}}} \right) = N. \quad (12)$$

Нехай тепловий потік, який визначається за формулою (12), нагріває лісову підстилку з деякою площею S_2 . Тоді, як зазначалося вище, для займання матеріалу потрібно передати йому кількість теплоти

$$Q = (c_u m_u + c_{реч} m_{реч}) (T_{кип} - T_0) + \lambda_u m_u + c_{реч} m_{реч} (T_{займ} - T_{кип}), \quad (13)$$

де c_v та $c_{реч}$ – питомі теплоємності води та речовини у підстилці на площі S_2 та масовими частками m_v та $m_{реч}$, λ_v – питома теплота пароутворення води, T_0 , $T_{кип}$ та $T_{займ}$ – температура навколишнього середовища, кипіння води та займання речовини. З іншого боку,

$$Q = \frac{d\Phi}{dS_2} S_2 t, \quad (14)$$

де t – час. Прирівнявши праві частини співвідношень (13) та (14), одержуємо формулу, за допомогою якої може бути обчислений час, необхідний для займання лісової підстилки внаслідок дії теплового потоку.

$$t = \frac{(c_u m_u + c_{реч} m_{реч}) (T_{кип} - T_0) + \lambda_u m_u + c_{реч} m_{реч} (T_{займ} - T_{кип})}{NS_2}, \quad (15)$$

де N визначається з (12).

Висновок.

На основі теоретичних досліджень одержано формулу (15) для визначення часу, необхідного для займання лісової підстилки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Доррер Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров. – М.: «Лесная промышленность», 1979. – 160 с.
2. Гуліда Е.М., Карабин О.О., Смотр О.О. Математична модель поширення лісових пожеж //Зб. наук. праць “Пожежна безпека”. – № 6, 2005. – С. 7-12.
3. Калиновський А.Я., Сознік О.П. Моделювання поширення ландшафтної пожежі з урахуванням флуктуацій вітру і вологості пального матеріалу //Зб. наук. праць “Пожежна безпека”. – № 6, 2005. – С. 25-29.
4. Кузик А.Д., Карабин О.О. Моделювання процесу поширення лісової пожежі в умовах гірської місцевості //Зб. наук. праць “Пожежна безпека”. – № 6, 2005. – С. 49-53.
5. Гуліда Е.М., Карабин О.О., Смотр О.О., Кузик А.Д. Математична модель поширення лісової пожежі з урахуванням конвективного теплообміну //Зб. наук. праць “Пожежна безпека”. – № 7, 2005. – С. 48-53.
6. Лісові пожежі у 2005 році. – Експрес-доповідь 12.12.2005р. – № 357. – <http://ukrstat.kmu.gov.ua/statistics/wsite/niostat/express/expr2005/1205/357.doc>
7. Свириденко В.Є., Бабіч О.Г., Швиденко А.Й. Лісова пірологія. – К.: Агропромвидав України, 1999. – 172 с.
8. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.
9. Дубровский И.М., Егоров Б.В., Рябошапка К.П. Справочник по физике. К.: «Наукова думка», 1986. – 557 с.