

РОЗДІЛ І. ГАСІННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ

УДК 614.843(075.32)

Е.М.Гуліда, д.т.н., професор, О.О.Карабин к.ф.-м.н., О.О.Смотр, (Львівський інститут пожежної безпеки МНС України)

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОШИРЕННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ

На основі аналізу існуючих підходів до побудови математичних моделей поширення лісової пожежі проведено моделювання поширення лісової пожежі аналітичним методом із врахуванням лише одного виду теплообміну, а саме теплопровідності.

На території України понад 10,8 млн. га займають ліси і торфовища [1]. Охорона лісів від пожеж - одне з важливих завдань у проблемі захисту біологічного середовища. Для покращення охорони лісів від пожеж не достатньо розвитку і удосконалення тільки технічних засобів боротьби з вогнем. Все більшого розвитку набувають раціональна організація і ефективне управління роботою людей і техніки задіяних в системі охорони лісів від пожеж, що вимагає залучення математичних методів і засобів обробки інформації.

Лісову пожежу можна розглядати як розподілену в просторі відкриту динамічну систему, що є сукупністю фізико-хімічних процесів горіння лісових горючих матеріалів, умов, за яких ці процеси відбуваються і засобів впливу на них (керування) [2].

Більшість відомих на даний час моделей швидкості поширення лісових пожеж використовують аналітичний, експериментальний та змішаний експериментально-аналітичний методи.

Аналітичний підхід побудований на відомих законах збереження енергії маси та імпульсу на сучасному етапі поки ще не знайшов свого реального впровадження в моделях горіння. Це пояснюється ще мало вивченим механізмом тепло- та масопереносу при горінні рослинного матеріалу та значних аналітичних і обчислювальних труднощів. Але такі моделі є деяким еталоном, згідно з яким можна оцінювати повноту більш простих і зручних для практики даних по лісових пожежах. Крім цього, такі моделі дають можливість встановлювати критерії подібності процесу, що має велике значення для вивчення природи лісових пожеж.

Процес спалаху і горіння лісових рослинних матеріалів є складним процесом із багатьма стадіями. Під час будь-якої пожежі, зокрема і лісової, наявні три види теплообміну: теплопровідність, конвективний теплообмін і теплове випромінювання, однак, часто на тій чи іншій фазі розвитку пожежі або на певній її ділянці може переважати лише один вид теплообміну. При побудові математичної моделі поширення лісової пожежі необхідно врахувати всі три види теплообміну.

Тома розроблення математичних моделей лісових пожеж аналітичним методом є актуальною задачею сучасності.

Мета роботи – розроблення моделі поширення лісових пожеж аналітичним методом із врахуванням лише одного виду теплообміну, а саме теплопровідності шару лісової підстилки та землі в межах лісового масиву.

Розроблення математичної моделі поширення лісових пожеж. Аналітичне дослідження теплопровідності зводиться до вивчення просторово-часової зміни температури, а саме до знаходження функції

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (1)$$

Рівняння (1) є математичним виразом температурного поля, коли температура змінюється із плином часу від однієї точки до іншої (нестационарне температурне поле).

Якщо температура в кожній точці поля із плином часу залишається незмінною, то таке температурне поле називається стаціонарним. В цьому випадку температура є функцією тільки координат:

$$t = f_1(x, y, z), \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0 \quad (2)$$

Диференціальне рівняння теплопровідності встановлює зв'язок між часовою і просторовою зміною температури в будь-якій точці тіла, в якому відбувається процес теплопровідності і має вигляд [3]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c\rho} \quad (3)$$

де λ (Вт/м К) – коефіцієнт теплопровідності середовища; q_v (Вт/м³) – потужність внутрішніх джерел тепла; c (Дж/кг К) – питома теплоємність; ρ (кг/м³) – густина речовини.

Умови однозначності задаються у вигляді:

- а) фізичних параметрів λ, c, ρ ;
- б) форми і геометричних розмірів об'єкта;
- в) температури тіла в початковий момент часу $\tau = 0, t = t_0 = f(x, y, z)$

Диференціальне рівняння теплопровідності та умови однозначності дають вичерпну модель поставленої задачі. З метою спрощення розглянемо процес поширення тепла по ґрунту від джерела пожежі лише в одному напрямку x на віддаль $x = \ell$ без врахування внутрішніх джерел тепла, тобто розглянемо одновимірну задачу теплопровідності, для якої рівняння (3) набуває вигляду:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right) \quad (4)$$

де згідно з фізичними характеристиками ґрунту

$$\lambda = 0,8 \text{ Вт/м К}; c = 0,84 \text{ кДж/кг К}; \rho = 180 \text{ кг/м}^3.$$

Початкові умови:

- а) при $\tau = 0, t = F(x)$;
- б) при $x=0 \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=0} = 0$
- в) при $x=\ell \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=\ell} = -\frac{\lambda}{c\rho} \tau_{x=\ell}$

За початок координат приймаємо джерело виникнення пожежі.

Загальний розв'язок рівняння (4) можна подати у вигляді суми ряду:

$$t = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) e^{-\mu_n^2 \frac{\lambda \tau}{c\rho \ell^2}} \quad (5)$$

сталі A_n знаходимо з початкових умов:

$$A_n = \frac{\mu_n}{\ell(\mu_n + \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n)} \int_{-\ell}^{\ell} F(x) \cdot \cos\left(\mu_n \frac{x}{\ell}\right) dx \quad (6)$$

де $\mu_n = (2n-1)\frac{\pi}{2}$, $n \in \mathbb{N}$

Розв'яжемо поставлену задачу теплопровідності скінченим різницевим методом. Суть цього методу полягає в тому, що в диференціальному рівнянні похідні шуканої функції замінюються наближеним співвідношенням між скінченими різницями в окремих вузлових точках температурного поля. В результаті такої заміни отримаємо рівняння в скінчених різницях, розв'язування якого зводиться до виконання простих алгебраїчних операцій. Розрахункове співвідношення зводиться до вигляду де шукана температура в вузловій точці є функцією часу, температури в розглянутій вузловій точці і температури в сусідніх точках. Такі рівняння складаються для всіх вузлових точок, включаючи і граничні точки.

Оскільки температура $t(x, \tau)$ є функцією двох змінних, зручно вибрати прямокутну сітку. Весь інтервал зміни x від 0 (джерела пожежі) до ℓ по осі абсцис розіб'ємо на однакові інтервали Δ_x , а відрізок часу від $\tau = 0$ до $\tau = T$ розділимо на рівномірні інтервали Δ_τ . Перпендикуляри до координатних осей в точках поділу при перетині утворюють розрахункові вузлові точки.

Довжини інтервалів залежать від фізичних властивостей ґрунту, по якому поширюється пожежа. Аналіз відхилення наближеного розв'язку від точного показує, що стійкість розрахунку забезпечується за умови, коли:

$$2 \frac{\lambda \Delta_\tau}{c\rho \Delta_x^2} - 1 \leq 0 \quad (7)$$

Тому для забезпечення точності розв'язку вибрано таку шкалу розбиття, за якою $\Delta_x = 0,2\text{м}$, $\Delta_\tau = 40\text{с}$, при цьому $\frac{\lambda \Delta_\tau}{c\rho \Delta_x^2} = \frac{1}{2}$

Рекурентна формула для обчислення температури у вузловій точці з координатами $(m \Delta_x, k \Delta_\tau)$ має вигляд:

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

$$k = 0, 1, 2, \dots$$

$$T_{m,k+1} = \frac{\lambda \Delta_\tau}{c\rho \Delta_x^2} (T_{m+1,k} - T_{m-1,k}) - \left(\frac{2\lambda \Delta_\tau}{c\rho \Delta_x^2} - 1 \right) \cdot T_{m,k} \quad (8)$$

При вибраній шкалі розбиття коли $\frac{\lambda \Delta_\tau}{c\rho \Delta_x^2} = \frac{1}{2}$ формула (8) набуває вигляду

$$T_{m,k+1} = \frac{1}{2} (T_{m+1,k} - T_{m-1,k})$$

Для розрахунку температурного поля в напрямку осі x було прийнято у вигляді крайових умов те, що процес розповсюдження тепла є стаціонарним. Виходячи з цього розглянемо диференціальне рівняння теплопровідності для стаціонарного режиму, тобто

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0 \quad (9)$$

Перше інтегрування дає:

$$\frac{\partial t}{\partial x} = C_1 \quad (10)$$

Після другого інтегрування отримуємо

$$t = C_1 x + C_2 \quad (11)$$

Постійні C_1 і C_2 в рівнянні (11) визначаються з граничних умов:

при $x = 0$ $t = t_{c1}$ $C_2 = t_{c1}$

при $x = \ell$ $t = t_{c2}$ і $C_1 = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\ell}$

Підставляючи значення постійних C_1 і C_2 в рівнянні (11), отримуємо закон розподілу температури в напрямку осі x :

$$T_{i,0} = T_a - \frac{(T_a - T_c) \cdot x_i}{\ell}, \quad i = 1, \ell \quad (12)$$

де $T_a = 390^\circ\text{C}$ – температура вогнища; $T_c = 18^\circ\text{C}$ – температура середовища у весняний період; $x_i = \ell \cdot i$; $\ell = 0,8$ м.

На підставі результатів експериментальних досліджень було встановлено значення температури вогнища $T_a = 390^\circ\text{C}$, яка на відстані 0,8 м зменшувалася до температури навколишнього середовища $T_c = 18^\circ\text{C}$ у весняний період часу.

Формула (12) є результатом розв'язку стаціонарної задачі теплопровідності.

Для встановлення крайових умов по осі τ були проведені експериментальні дослідження для визначення зростання температури у вогнищі виникнення лісової пожежі. Для цього були виконані згідно з ДСТУ 3675-97 випробування зростання температури у вогнищі від початку температури спалаху до максимального значення температури в джерелі горіння. На підставі отриманих даних було визначено значення зміни температур, яке знаходилося в межах від 390°C (температура спалаху) до 800°C (температура джерела вогнища). Температура вогнища зростає від температури спалаху соснової деревини 390°C до температури джерела 800°C в середньому за 160с і залишається сталою. Отримані значення були введені в математичну модель розповсюдження лісової пожежі як крайові умови по осі τ , тобто часу поширення лісової пожежі і мають вигляд: $T_{0,1} = 595^\circ\text{C}$; $T_{0,2} = 698^\circ\text{C}$; $T_{0,3} = 749^\circ\text{C}$; $T_{0,4} = 800^\circ\text{C}$.

На підставі отриманих результатів експериментальних досліджень і з використанням скінченного різницевого методу, тобто з використанням математичної моделі передачі тепла завдяки теплопровідності шару лісової підстилки було визначено температурне поле в межах від вогнища пожежі на відстань до 3,4м. Результати цих досліджень представлені в табл.1.

Значення температур температурного поля розповсюдження лісової пожежі у весняний період

Час τ, с	Т-ра по осі у вогнища пожежі, °С	Відстань від вогнища пожежі ℓ , м																
		0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4
		Температура по осі x , °С																
920	800	683	553	433	332	244	179	125	90	62	46	34	28	23	21	19	19	18
880	800	680	546	427	320	237	168	120	82	60	42	33	26	23	20	19	18	18
840	800	676	540	416	313	225	162	110	79	54	41	30	25	21	20	19	18	18
800	800	673	531	408	300	218	150	106	71	52	36	30	24	21	19	19	18	18
760	800	667	525	396	292	204	144	96	68	46	36	27	23	20	19	18	18	18
720	800	663	515	387	277	196	131	92	60	45	32	27	22	20	19	18	18	18
680	800	657	507	372	267	181	125	81	58	39	31	24	22	19	19	18	18	18
640	800	652	494	361	250	173	112	78	51	38	28	24	20	19	18	18	18	18
600	800	644	484	344	239	157	107	68	49	34	28	22	20	19	18	18	18	18
560	800	637	468	330	220	148	93	65	42	33	25	22	19	19	18	18	18	18
520	800	627	454	309	207	131	89	56	42	29	25	20	19	18	18	18	18	18
480	800	616	434	292	185	123	76	55	36	29	22	20	19	18	18	18	18	18
440	800	602	412	265	171	105	74	46	36	25	22	19	19	18	18	18	18	18
400	800	582	383	242	148	101	63	46	30	25	20	19	18	18	18	18	18	18
360	800	558	343	209	140	87	62	39	30	22	20	18	18	18	18	18	18	18
320	800	493	296	194	121	86	52	39	25	22	19	18	18	18	18	18	18	18
280	800	424	268	169	120	73	52	31	25	19	19	18	18	18	18	18	18	18
240	800	370	232	166	105	73	41	31	21	19	18	18	18	18	18	18	18	18
200	800	313	227	152	105	59	41	24	21	18	18	18	18	18	18	18	18	18
160	800	303	216	152	88	59	30	24	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
120	749	297	216	134	88	41	30	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
80	698	297	204	134	65	41	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
40	595	297	204	111	65	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
0	390	297	204	111	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18

На підставі отриманих результатів (табл.1) визначаємо значення часу та температури, при якій виникає спалах деревини, яка розглядається в даному випадку. В даному випадку $\tau = 760\text{с}$, а відстань від центра вогнища пожежі 0,6м. Виходячи з цих даних визначаємо швидкість розповсюдження пожежі тільки з урахуванням теплопровідності ґрунту

$$V = \ell / \tau = 0,6 / 760 \text{ м/с} = 0,000789 \text{ м/с} = 2,84 \text{ м/год.}$$

Результати розрахунків підтверджують достовірність розробленої математичної моделі, (порівн. з табличними даними, наведеними в [4]). Зауважимо, що в побудованій математичній моделі ще не врахована теплопровідність шару лісової підстилки, передача тепла методом конвекції і теплового випромінювання, а також не врахована швидкість переміщення повітря зовнішнього середовища.

Висновки. На підставі проведення теоретичних та експериментальних досліджень можна зробити такі висновки:

1. Отримана математична модель визначення температурного поля розповсюдження лісової пожежі, яка дає можливість визначити швидкість поширення контуру ландшафтної лісової пожежі.

2. Результати експериментальних досліджень показали, що після спалаху вогнища соснової деревини температура вогнища підвищується від температури спалаху до стаціонарної температури 800°C приблизно за 2,7хв.

3. Результати виконаної роботи показують, що отримані результати є достовірними в порівнянні з даними довідникової літератури, які отримані на підставі результатів експериментальних досліджень. Для отримання результатів із врахуванням конвективного теплообміну в процесі горіння та теплового випромінювання при виникненні лісової пожежі необхідно продовжити роботу в цьому напрямку.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Загальна характеристика лісів України// Офіційний сайт науково-інформаційного центру лісоуправління// <http://www.fmsc.com.ua/index.php>*
2. *Доррер Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров. – М.: Лесная промышленность, 1979. – 160с.*
3. *Исаченко В.П.. Теплопередача. –М., Энергия, 1975.—486с.*
4. *Иванников В.П., Ключ П.П. Справочник руководителя тушения пожара. – М.: Стройиздат, 1987. – 279с.*