

В.О. Самарін, викладач, НУЦЗУ

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАПАЛЮВАННЯ ШАРУ ГОРЮЧОГО МАТЕРІАЛУ СФОКУСОВАНИМ ПОТОКОМ ВИПРОМІНЮВАННЯ

(представлено д-ром техн. наук Куценком Л.М.)

Проведене чисельне моделювання умов запалювання шару лісового горючого матеріалу в результаті впливу сфокусованого потоку сонячного випромінювання з урахуванням пористості лісового горючого матеріалу і проникнення випромінювання вглиб шару.

Ключові слова: Лісовий горючий матеріал, сфокусоване сонячне випромінювання, закон Бугера-Ламберта-Бера.

Постановка проблеми. Останніми роками спостерігається почастищення проявів екстремальних погодних умов в окремих регіонах України. В тому числі має місце збільшення максимальних температур і числа посушливих днів. У зв'язку з цим актуальним є катастрофічний сценарій лісової пожежної небезпеки, коли вміст вологи в лісовому горючому матеріалі (ЛГМ) настільки малий, що це практично не впливає на умови запалювання. В такому випадку можна вважати, що шар ЛГМ складається з повітря і сухої органічної речовини [1]. Щільність сухої органічної речовини ЛГМ значно більше щільності повітря, але частка її дуже мала (4-6%), тому випромінювання в пористій структурі ЛГМ може відігравати важливу роль. При впливі променистого теплового потоку високої інтенсивності частина випромінювання поглинається верхніми шарами ЛГМ, що повинно призводити до зміни інтенсивності тепло-масопереносу в ЛГМ. Представляє інтерес моделювання процесу запалювання лісового горючого матеріалу з урахуванням його пористості і проникнення випромінювання в глибину шару.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відповідно до [1] об'ємну частку сухої органічної речовини φ_1 можна оцінити за формулою:

$$\varphi_1 = \frac{m}{\rho_1 V},$$

де m – маса зразка шару ЛГМ в контрольному об'ємі, V - величина контрольного обсягу, ρ_1 - типова щільність елемента ЛГМ (хвоїнки). Як показали оцінки [1], для шару з хвоїнок об'ємна частка сухої органічної речовини змінюється в межах $0,03 < \varphi_1 < 0,06$, тобто об'ємна частка конденсованої речовини істотно мала в порівнянні з об'ємною часткою повітря.

В [1] експериментально досліджено зміну радіаційного потоку

зі зміною висоти шару. В результаті обробки експериментальних даних автори [1] встановили, що залежність відносної інтенсивності потоку після проходження через шар ЛГМ від висоти шару укладається на пряму лінію в координатах $\ln q_r, rz$, де q_r - променистий тепловий потік, ρ - щільність пористого середовища, z - координата. У підсумку в [1] зроблено висновок про те, що ослаблення променистого потоку при проходженні через шар хвої описується виразом, аналогічним рівнянню закону Бугера-Ламберта-Бера.

Постановка задачі та її розв'язання. Задачею дослідження є проведення порівняльного аналізу моделей запалювання шару ЛГМ потоком сфокусованого сонячного випромінювання.

При постановці задачі приймаємо наступну схему досліджуваного процесу. На підстилаючій поверхні розташований шар ЛГМ, на малій ділянці якого фокусується потік сонячного випромінювання. Процеси, що відбуваються в елементі, що фокусує, не моделюються у зв'язку з відсутністю як експериментальних даних, так і результатів теоретичних досліджень з цієї проблеми. Шар ЛГМ нагрівається і термічно розкладається з утворенням газоподібних продуктів піролізу. Склад газової суміші приймається трикомпонентним (горюча компонента - монооксид вуглецю, окислювач - кисень, інертні компоненти). Продукти піролізу дифундують в область газової суміші. При певній температурі і концентраціях реагуючих газів відбувається запалювання суміші.

Приймаємо наступні критерії запалювання: 1) тепловиділення від хімічної реакції перевищує тепловий потік від нагрітої поверхні в область газової суміші; 2) температура в газовій суміші сягає критичного значення. На рис. 1 представлено геометрію області рішення. Процес запалювання шару ЛГМ сфокусованим потоком сонячного випромінювання описується системою одновимірних нестационарних нелінійних рівнянь теплопровідності та дифузії з відповідними початковими і граничними умовами. Чисельна реалізація проведена з використанням кінцево-різницевого методу. Різницеві аналоги одновимірних рівнянь теплопровідності та дифузії вирішуємо методом прогонки в поєднанні з методом простої ітерації [3].

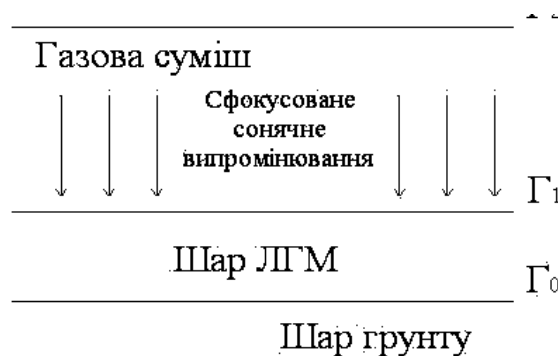


Рис. 1 - Область рішення

Рівняння енергії для шару ЛГМ:

$$\rho_{ef} c_{ef} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_{ef} \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} + q_p k_1 \rho_1 \phi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_1}\right) + (1 - \phi_1) q_s \exp(-k_r \rho_{ef} z). \quad (1)$$

Рівняння енергії для газової суміші:

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} + q_5 (1 - v_5) R_5. \quad (2)$$

Граничні умови для рівнянь (1) – (2):

$$\Gamma_0: \quad \alpha_1 (T - T_{es}) = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}, \quad (3.1)$$

$$\Gamma_1: \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} + \phi_{1w} q_s, \quad T_1 = T_2, \quad (3.2)$$

$$\Gamma_2: \quad \alpha_2 (T_{ea} - T) = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}. \quad (3.3)$$

Початкові умови для рівнянь (1) – (2):

$$T_i|_{t=0} = T_{i0}, \quad i = 1, 2. \quad (4)$$

Кінетичне рівняння і початкова умова:

$$\rho_1 \frac{\partial \phi}{\partial t} = -k_p \rho_1 \phi \exp\left(-\frac{E_1}{RT_1}\right), \quad \phi|_{t=0} = \phi_0. \quad (5)$$

Рівняння дифузії для окислювача:

$$\frac{\partial C_4}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_4}{\partial z^2} - \frac{M_4}{M_5} R_5. \quad (6)$$

Граничні умови для рівняння (6):

$$\Gamma_1: \quad \rho D \frac{\partial C_4}{\partial z} = 0, \quad (7.1)$$

$$\Gamma_2: \quad \rho D \frac{\partial C_4}{\partial z} = 0. \quad (7.2)$$

Початкові умови для рівняння (6):

$$C_4|_{t=0} = C_{4.0}. \quad (8)$$

Рівняння дифузії для горючих компонент піролізу:

$$\frac{\partial C_5}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_5}{\partial z^2} - R_5. \quad (9)$$

Граничні умови для рівняння (9):

$$\Gamma_1: \quad \rho D \frac{\partial C_5}{\partial z} = Y_5, \quad (10.1)$$

$$\Gamma_2: \quad \rho D \frac{\partial C_5}{\partial z} = 0. \quad (10.2)$$

Початкові умови для рівняння (9):

$$C_5|_{t=0} = C_{5.0}. \quad (11)$$

Рівняння балансу маси:

$$\sum_{i=4}^6 C_i = 1. \quad (12)$$

Початкові умови для рівняння (12):

$$C_6|_{t=0} = C_{6.0}. \quad (13)$$

Масова швидкість реакції R_5 [2]:

$$R_5 = k_5 M_5 T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT_1}\right) \cdot \begin{cases} x_1^{0.25} x_2, & x_1 > 0.05 \\ x_1 x_2, & x_1 \leq 0.05 \end{cases} \quad (14)$$

$$x_i = \frac{C_i}{\sum_{k=4}^6 \frac{C_k}{M_k} M_i}, \quad (15)$$

де T_i , ρ_i , c_i , λ_i - температура, щільність, теплоємність, теплопровідність (1 - шару ЛГМ, 2 - повітря); C_i , M_i - концентрація і молярна маса (4 - окислювача, 5 - горючого газу, 6 - інертних компонентів повітря); q_p - тепловий ефект реакції піролізу ЛГМ; k_1 - передекспонент реакції піролізу ЛГМ; E_1 - енергія активації реакції піролізу ЛГМ; R - універсальна газова стала; φ_1 - об'ємна частка сухої органічної речовини ЛГМ ($i = 1$) і повітря ($i = 2$); q_5 - тепловий ефект реакції окислення оксиду вуглецю; v_5 - частка теплоти, поглинена шаром ЛГМ; R_5 - масова швидкість реакції окислення оксиду вуглецю; α_1 - коефіцієнт теплопередачі; α_2 - коефіцієнт тепловіддачі; k_5 - передекспонент реакції окислення оксиду вуглецю; E_5 - енергія активації реакції окислення оксиду вуглецю; D - коефіцієнт дифузії; Y_5 - потік маси горючих продуктів піролізу; x_i - допоміжна змінна; q_s - потік сфокусованого сонячного випромінювання; kr - коефіцієнт ослаблення; z - просторова координата; t - тимчасова координата. Індокси es , ea , 0 , w , ef відповідають параметрам навколишнього середовища в ґрунті, повітрі, початковий момент часу, на межі розділу ЛГМ-повітря і ефективним характеристикам.

При чисельному моделюванні використані такі вихідні дані [4]: $\rho_1 = 500 \text{ кг/м}^3$, $\rho_2 = 0,1 \text{ кг/м}^3$, $c_1 = 1400 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$; $c_2 = 1200 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{K)}$; $\lambda_1 = 0,102 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$; $\lambda_2 = 0,1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$; $q_p = 1000 \text{ Дж/кг}$; $k_1 = 3,63 \cdot 10^4$; $E_1/R = 9400 \text{ K}$; $\varphi_{1н} = 1$; $q_5 = 10^7 \text{ Дж/кг}$; $k_5 = 3 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$; $E_5/R = 11500 \text{ K}$; $v_5 = 0,3$; $\alpha_1 = 20 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$; $\alpha_2 = 80 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$; $D = 10^{-6}$; $M_4 = 0,032$; $M_5 = 0,028$; $M_6 = 0,044$; $k_r = 5,1 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Досліджувалися дві моделі: 1) шар ЛГМ повністю заповнений сухим органічною речовиною; 2) структура шару ЛГМ пухка й пориста. У таблиці представлені результати чисельного визначення часу за-

тримки запалення, як по першій моделі, так і по другій. Також представлені відомі експериментальні дані [4-6] по τ_{ign} .

Таблиця 1 - Час затримки запалення шару ЛГМ променистим тепловим потоком

Тепловий потік, $q_s, \text{Вт/м}^2$	Час затримки займання (розрахунок, вар. 1), $\tau_{ign}, \text{с}$	Час затримки займання (розрахунок, вар. 2), $\tau_{ign}, \text{с}$	Час затримки займання (експеримент [4-6]), $\tau_{ign}, \text{с}$
15	96	119	Немає запалювання
20	59	80	197-207
25	31	50	93-100
30	24	42	40-42
35	20	37	27-30
40	18	34	18-26

Теоретична межа q_s , за якої ще можливе займання шару ЛГМ, за результатами чисельного дослідження в обох варіантах складає 15 кВт/м^2 . Відносно низькі концентрації потоку природного сонячного випромінювання здатні призвести до займання шару ЛГМ і виникненню низової лісової пожежі. У діапазоні $(15 \div 25) \text{ кВт/м}^2$ теоретичні оцінки часів затримки займання нижче тих, що встановлені експериментально (для обох моделей). Найбільш близьке узгодження теоретичних та експериментальних значень τ_{ign} відповідає $q_s = 30 \text{ кВт/м}^2$. У діапазоні 35 кВт/м^2 і вище більш адекватно процес описується моделлю без урахування пористої структури ЛГМ. Для моделі пористого шару ЛГМ встановлено, що теоретичні значення τ_{ign} перевищують на 40% часи затримки запалення, розраховані за моделлю монолітного шару. Цей результат обумовлений тим, що при радіаційному тепловідведенні енергія від поверхні, що нагрівається, вглиб матеріалу температура в тонкому приповерхневому шарі менше в порівнянні з варіантом монолітної (непористої) структури ЛГМ. Відповідно умови запалювання досягаються пізніше у випадку пористого лісового горючого матеріалу. При цьому за рахунок додаткової енергії, що надходить в глибинні шари ЛГМ, інтенсифікується процес термічного розкладання хвої. Але так як цей процес є ендотермічним, а газоподібні продукти піролізу, що фільтруються до поверхні, яка нагрівається, мають меншу, ніж каркас ЛГМ температуру, то в результаті температура в кожній точці прогрітого шару дещо знижується в порівнянні з непористим ЛГМ. Типовий розподіл температури по вертикальній координаті в системі «шар ЛГМ - газова суміш» в момент запалювання представлено на рис. 2. Пік на температурній кривій відповідає місцю локалізації хімічної реакції окиснення монооксиду вуглецю до діоксиду вуглецю. Аналіз результатів зміни температури показує, що пористий шар прогрівається глибше і, як наслідок, на велику глибину відбувається його термічний розклад.

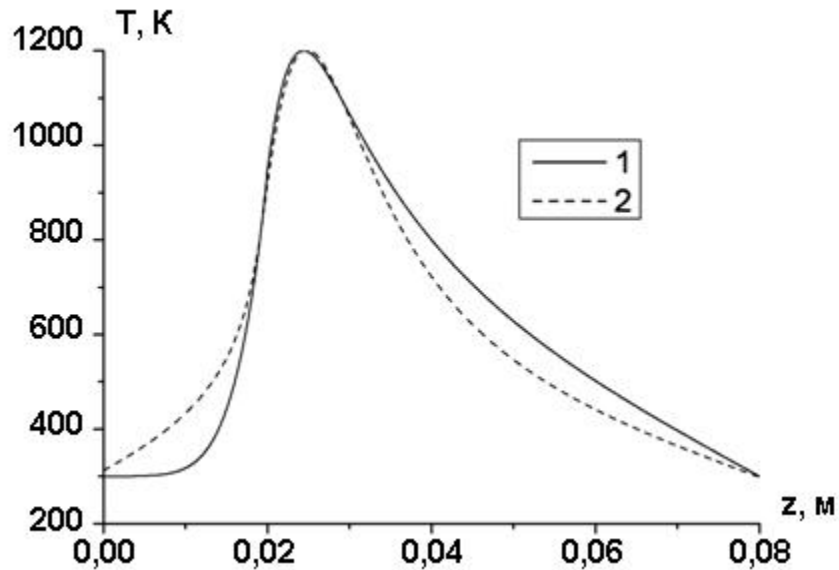


Рис. 2 - Розподіл температури в системі «Шар ЛГМ - газова суміш» в момент запалювання при $q_s=15000 \text{ Вт/м}^2$: 1 – варіант моделі суцільного шару; 2 - варіант моделі з урахуванням пористої структури шару

Висновки. Для різних інтенсивностей випромінювання проведений порівняльний аналіз впливу пористості ЛГМ і проникнення випромінювання в шар на умови запалювання.

Встановлений вплив радіаційного теплопереносу на умови запалювання ЛГМ відображає специфіку процесів прогріву ЛГМ в період, що передуює запаленню і може бути використаний при прогнозуванні лісової пожежної небезпеки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гришин А.М. Зажигание лесных горючих материалов потоком лучистой энергии. / А.М. Гришин, В.П. Зима, В.Т. Кузнецов и др. // Физика горения и взрыва. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – Том 38, № 1. - С.30-35.
2. Гришин А.М. Математическое моделирование распространения вершинных лесных пожаров в однородных лесных массивах и вдоль просек. /А.М. Гришин, О.В. Шипулина // Физика горения и взрыва. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. - Т.38, №6. С.17-29.
3. Самарский А.А. Теория разностных схем. М. : Наука, 1983. С.33-36.
4. Касперов Г.И. Исследование пожароопасных свойств лесных горючих материалов сосновых насаждений / Г.И. Касперов, П.Н. Гоман // Труды Белорус. гос. технол. ун-та. Сер. II. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. Минск : Изд-во БГТУ, 2010. Вып. XVIII. С.337-340.

5. Барановский Н.В. Конкретизация неустановленных причин в детерминированно-вероятностной модели прогноза лесной пожарной опасности. / Н.В. Барановский, Г.В. Кузнецов // Пожаровзрывобезопасность. 2011. Т.20, №6. С.24-27.

6. Кузнецов Г.В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. / Г.В. Кузнецов, Н.В. Барановский // Новосибирск.: Изд-во СО РАН, 2009. - 301 с.

nsczu.edu.ua

В.А. Самарин

Моделирование зажигания слоя горючего материала сфокусированным потоком излучения

Проведено численное моделирование условий зажигания слоя лесного горючего материала в результате воздействия сфокусированного потока солнечного излучения с учетом пористости лесного горючего материала и проникновения излучения вглубь слоя.

Ключевые слова: Лесной горючий материал, сфокусированное солнечное излучение, закон Бугера-Ламберта-Бера.

V.O. Samarin

Modeling ignition of combustible material layer by focused radiation flow

Numerical simulation of the conditions of ignition of forest fuel material under the influence of the focused solar flux with the porosity of forest fuel and penetration of radiation deep into the layers was conducted.

Keywords: forest fuel, focused solar radiation, Buger-Lambert-Ber law.