

*В.А. Гузенко, к.т.н., доцент, нач. кафедри, НУЦЗУ,
В.О. Самарін, викладач, НУЦЗУ*

АНАЛІЗ УМОВ ЗАПАЛЮВАННЯ ШАРУ ГОРЮЧОГО МАТЕРІАЛУ СФОКУСОВАНИМ ПОТОКОМ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

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

Проведено теоретичну оцінку умов запалювання шару лісового горючого матеріалу сфокусованим потоком сонячного випромінювання. Розглянуто сценарій запалення, коли волога в шарі лісового горючого матеріалу відсутня.

Ключові слова: запалювання, лісовий горючий матеріал, хімічна реакція, скло, сфокусоване сонячне випромінювання.

Постановка проблеми. Запалювання лісового горючого матеріалу (ЛГМ) променистим тепловим потоком може бути однією з причин виникнення лісових пожеж. Природним концентратором енергії можуть виявитися великі краплі смоли хвойних дерев, а в якості антропогенного концентратора слід розглядати частково або повністю заповнені будь-якою прозорою рідиною скляні ємності або їх осколки. Представляє інтерес математичне моделювання запалювання шару ЛГМ в результаті впливу сфокусованого потоку сонячного випромінювання та визначення критичних умов процесу займання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В рамках фізичної моделі [1] не враховується проникнення сонячного випромінювання в шар ЛГМ. Передбачається, що надходження тепла в шар ЛГМ здійснюється тільки на межі розділу середовищ «Шар ЛГМ» і «газова суміш».

Постановка задачі та її розв'язання. При постановці задачі приймаємо наступну схему процесу. На підстилаючій поверхні розташований шар ЛГМ, на малій ділянці якого фокусується потік сонячного випромінювання. Процеси, що відбуваються в фокусуєчому елементі, не моделюються, так як в даний час немає ані теоретичних, ані експериментальних результатів дослідження проходження сонячного випромінювання через скляні об'єкти і смолисті утворення в реальній геометрії. Шар ЛГМ нагрівається й термічно розкладається з утворенням газоподібних продуктів піролізу. Склад газової суміші приймається трикомпонентним (горюча речовина – 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.

Символами Γ позначено межі області рішення і різних шарів.

Конвективний перенос тепла і речовини не враховується, оскільки в період запалювання теплова і дифузійна довжини релаксації на кілька порядків більше конвективної [3]. На рис. 1 представлена геометрія області рішення.

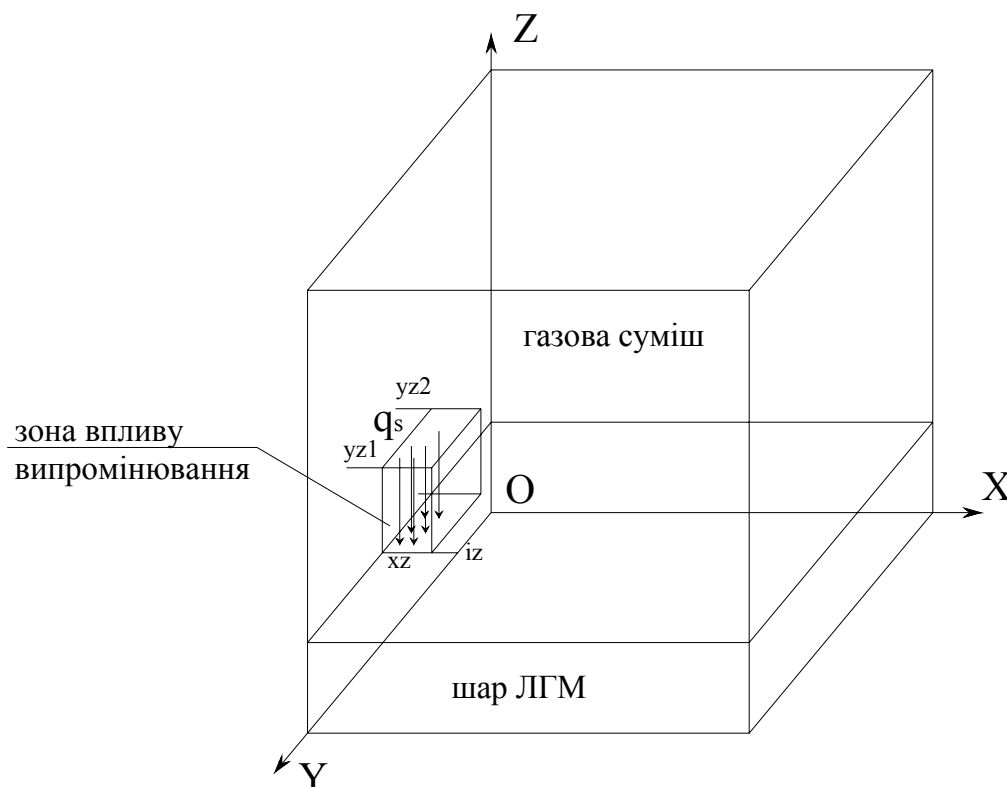


Рис. 1 – Область рішення

Займання шару ЛГМ сфокусованим потоком сонячного випромінювання описується системою тривимірних нестационарних нелінійних рівнянь теплопровідності та дифузії (1), (2), (6), (9) з відповідними початковими та граничними умовами. Чисельна реалізація проведена з використанням локально-одновимірною кінцево-різницевого методу. Різницеві аналоги одновимірних рівнянь теплопровідності та дифузії вирішені методом прогонки в поєднанні з методом простої ітерації [4].

Рівняння енергії для шару ЛГМ:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right) - q_p k_1 \rho_3 \varphi \exp\left(-\frac{E_1}{RT_1}\right). \quad (1)$$

Рівняння енергії для газової суміші:

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

Граничні умови для рівнянь (1), (2):

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

$$\Gamma_1: \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} + q_s, \quad T_1 = T_2, \quad (3.2.1)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}, \quad T_1 = T_2, \quad (3.2.2)$$

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

$$\Gamma_{3.1}: \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = 0, \quad (3.4)$$

$$\Gamma_{3.2}: \quad T_1 = T_{1s}, \quad (3.5)$$

$$\Gamma_{3.3}: \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0, \quad (3.6)$$

$$\Gamma_{3.4}: \quad \alpha_2 (T_{ea} - T) = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}, \quad (3.7)$$

$$\Gamma_{4.1}: \quad \alpha_1 (T - T_{es}) = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y}, \quad (3.8)$$

$$\Gamma_{4.2}: \quad \alpha_2 (T - T_{ea}) = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}, \quad (3.9)$$

$$\Gamma_{4.3}: \quad \alpha_2 (T_{es} - T) = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y}, \quad (3.10)$$

$$\Gamma_{4.4}: \quad \alpha_2 (T_{ea} - T) = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}. \quad (3.11)$$

Початкові умови для рівнянь (1), (2):

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

Кінетичне рівняння і початкова умова:

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -k_1 \rho_1 \varphi \exp\left(-\frac{E_1}{RT_1}\right), \quad \varphi|_{t=0} = \varphi_0. \quad (5)$$

Рівняння дифузії для окислювача:

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

Граничні умови для рівняння (6):

$$\Gamma_{1, \Gamma_2}: \quad \rho D \frac{\partial C_4}{\partial z} = 0, \quad (7.1)$$

$$\Gamma_{3.3, \Gamma_{3.4}}: \quad \rho D \frac{\partial C_4}{\partial x} = 0, \quad (7.2)$$

$$\Gamma_{4.2, \Gamma_{4.4}}: \quad \rho D \frac{\partial C_4}{\partial y} = 0. \quad (7.3)$$

Початкові умови для рівняння (6):

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

Рівняння дифузії для горючих компонент піролізу:

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

Граничні умови для рівняння (9):

$$\Gamma_1: \quad \rho D \frac{\partial C_5}{\partial z} = Y_5, \quad \rho D \frac{\partial C_5}{\partial z} = 0, \quad (10.1.1)$$

$$\Gamma_1: \quad \rho D \frac{\partial C_5}{\partial z} = 0, \quad (10.2)$$

$$\Gamma_{3.3, \Gamma_{3.4}}: \quad \rho D \frac{\partial C_5}{\partial x} = 0, \quad (10.3)$$

$$\Gamma_{4.2, \Gamma_{4.4}}: \quad \rho D \frac{\partial C_5}{\partial y} = 0. \quad (10.4)$$

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 [5]:

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

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

У формулах (1) – (15) прийняті наступні позначення: T_i , ρ_i , c_i , λ_i ; 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 – об'ємна частка сухої органічної речовини ЛГМ; 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; x , y , z – просторові координати; t – тимчасова координата. Індокси e_s , e_a , 0 відповідають параметрам навколишнього середовища в ґрунті, повітрі та в початковий момент часу.

При чисельному моделюванні використані такі вихідні дані [2]: $\rho_1 = 500 \text{ кг/м}^3$, $\rho_2 = 0,1 \text{ кг/м}^3$, $c_1 = 1400 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$; $c_2 = 1200 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{K)}$; $\lambda_1 = 0,102 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$; $\lambda_2 = 0,1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$; $q_p = 1000 \text{ Дж/кг}$; $k_1 = 3,63 \cdot 10^4$; $E_1/R = 9400 \text{ K}$; $\varphi_{1н} = 1$; $q_5 = 107 \text{ Дж/кг}$; $k_5 = 3 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$; $E_5/R = 11500 \text{ K}$; $v_5 = 0,3$; $\alpha_1 = 20 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$; $\alpha_2 = 80 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$; $D = 10^{-6}$; $M_4 = 0,032$; $M_5 = 0,028$; $M_6 = 0,044$.

В результаті обчислювальних експериментів отримана залежність часів затримки займання від величини теплового потоку сфокусованого сонячного випромінювання. Наявність вологи в шарі ЛГМ ігнорується і вологість приймається рівною нулю, що відповідає катастрофічним сценаріям пожежної небезпеки в лісі.

У табл. 1 наведені часи затримки запалення в залежності від величини теплового потоку сфокусованого сонячного випромінювання. Також наведені відомі експериментальні дані по запалюванню шару ЛГМ випромінюванням [6].

Сценарне моделювання дозволило встановити нижню межу теплового потоку сфокусованого сонячного випромінювання, за якого відбувається запалення шару ЛГМ. Моделювання здійснювалося в повній тривимірній постановці. Тепловий потік щільністю 15 кВт/м^2 є мінімальною величиною, при якому ще можливе займання шару ЛГМ. Таким чином, відносно невелике 10-кратне перевищення інтенсивності потоку природного сонячного випромінювання може призвести до виникнення осередку низової лісової пожежі. Середнє відхилення результатів чисельного моделювання від експериментальних даних склало близько 38%.

Табл. 1 – Часи затримки запалення шару ЛГМ променистим тепловим потоком

Тепловий потік q_s , кВт/м^2	Час затримки займання (розрахунок 2D) τ_{ign} , с	Час затримки займання (розрахунок 3D) τ_{ign} , с	Час затримки займання (експеримент [6]) τ_{ign} , с
15	99	105	Немає запалювання
20	62	63	197-207
25	33	34	93-100
30	26	26	40-42
35	21	21	27-30
40	18	18	18-26

Розподіл температури по вертикалі в центрі зони дії теплового потоку сфокусованого сонячного випромінювання представлено на рис. 2 в різні моменти часу. З результатів видно, що спочатку шар ЛГМ і газова суміш прогриваються інертно. Ця стадія триває до досягнення температури близько 900 К. З плином часу в деякому наближенні до поверхні шару ЛГМ відбувається прискорення хімічної реакції і зростання тепловиділення, формується характерний для області займання пік на температурній кривій (рис. 2).

В результаті редукції математичної моделі по одній з горизонтальних координат була отримана більш проста двовимірною математичною моделлю запалювання шару ЛГМ сфокусованим потоком сонячного випромінювання.

При величинах потоку сфокусованого сонячного випромінювання, що дорівнюють або перевищують 30 кВт/м^2 , відмінності часів затримки запалення по тривимірній та двовимірній постановках складає соті частки секунди. Найбільша розбіжність результатів, отриманих по двовимірній і тривимірній постановкам, помітно при нижній

межі променистого теплового потоку, за якого ще відбувається займання шару ЛГМ. Також максимальні відмінності між теоретичними оцінками і експериментальними даними [6] фіксуються в області низьких теплових потоків.

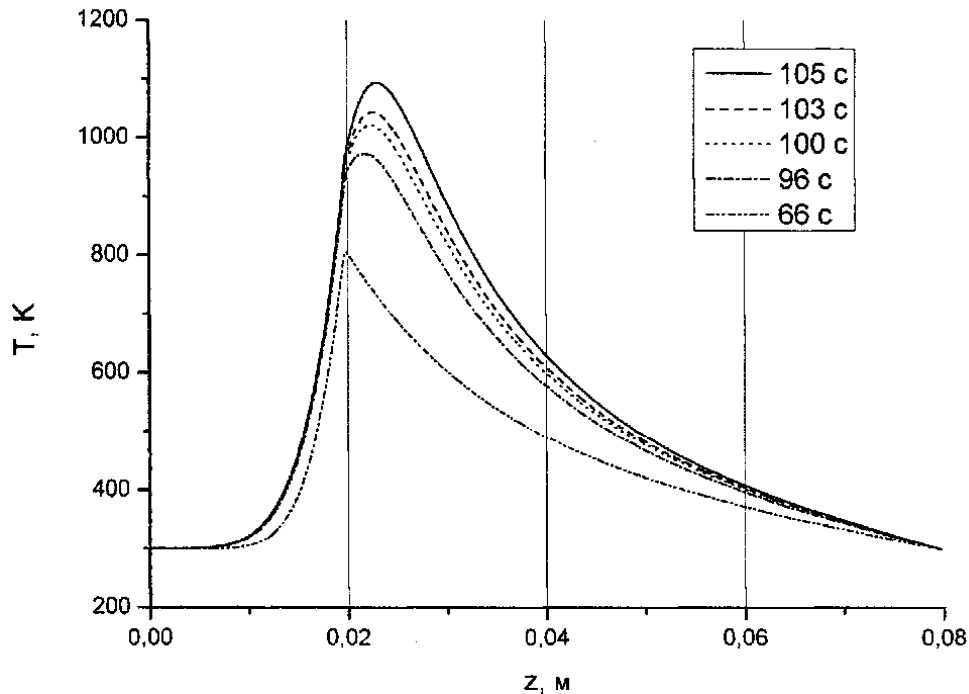


Рис. 2 – Розподіл температури в системі «шар ЛГМ – газова суміш» до і в момент запалювання при $q_s = 15000 \text{ Вт/м}^2$

Основні закономірності тепло- і масопереносу, встановлені в разі двовимірної постановки, зберігаються і для просторового моделювання. Додаткове відведення тепла по третій координаті і дифузія в цьому ж напрямку призводять до збільшення часу затримки запалення. Критерії запалювання виконуються для тих же умов, але настають вони пізніше.

Доцільно дослідити умови займання шару ЛГМ при малих периферичних розмірах зони впливу сфокусованого сонячного випромінювання. У табл. 2 представлені часи затримки запалення в залежності від теплового потоку випромінювання і периферичного розміру зони впливу.

В результаті обчислень було встановлено, що при периферичних розмірах зони впливу, рівних і менше 10 мм, величина τ_{ign} збільшується із зменшенням d . Такі зони впливу можна вважати точковими. Збільшується час затримки запалення. При інших рівних умовах для зони впливу з периферичним розміром 2 мм і менш встановлено, що займання не відбувається. Мінімальне відхилення спостерігається для периферичного розміру 10 мм і теплового потоку величиною 40 кВт/м^2 . Це пояснюється більш пізнім досягненням умов займання.

Потрібно більше часу, щоб концентрація горючої речовини досягла необхідного значення. Крім того, при таких точкових зонах впливу значну роль починає відігравати відтік тепла з цієї області в результаті теплопровідності. Обчислення показали, що при теплових потоках менше 20 кВт/м^2 не відбувається займання шару ЛГМ.

Табл. 2 – Часи затримки запалення в залежності від периферичного розміру зони впливу випромінювання

Периферичний розмір d , мм	Час затримки запалення τ_{ign} , с				
	40 кВт/м ²	35 кВт/м ²	30 кВт/м ²	25 кВт/м ²	20 кВт/м ²
10	26	35	48	69	108
8	35	49	70	104	159
6	59	84	126	-	-
4	154	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-

Слід зауважити, що результати проведених обчислювальних експериментів дозволяють зробити висновок про важливість периферичних розмірів зони дії теплового потоку випромінювання. В роботі [6] не представлені такі дані. Зазначено лише, що до складу випробувальної установки входить радіаційна панель з нагрівальним елементом. Можливо, відмінності в експериментальних даних і теоретичних результатах також пояснюються тим фактом, що в експерименті [6] не контролювався такий параметр, як периферичний розмір зони впливу променистого теплового потоку. Доцільно поставити експеримент, в якому б враховувалась залежність часу затримки запалення від периферичних розмірів зони впливу. Особливо це актуально для зон впливу з малим периферичним розміром.

Висновки. В результаті обчислювальних експериментів встановлено, що середнє відхилення в часах затримки запалення при використанні двовимірної і тривимірної постановок становить до 2%. Це повністю обґрунтовує можливість використання в практиці моніторингу та оцінки лісової пожежної небезпеки одновимірної і двовимірної постановок.

Показано, що при периферичних розмірах зони впливу сфокусованого сонячного випромінювання, що дорівнюють або менше 10 мм, величина залежить від розмірів зони нагріву ЛГМ. Зі зменшенням d збільшується час затримки займання. Для малих периферичних розмірів зони впливу випромінювання займання взагалі не відбувається.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гришин А.М. Математическое моделирование зажигания лесных горючих материалов в результате столкновительных и техногенных катастроф в квазиодномерном приближении / А.М. Гришин, К.Н.

Ефимов, В.А. Перминов // Физика горения и взрыва. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1996. – Том 32, № 2. – С. 18-30.

2. Кузнецов Г.В. Моделирование зажигания слоя лесного горючего материала сфокусированным потоком солнечного излучения с учетом пористости ЛГМ и проникновения излучения в слой / Г.В. Кузнецов, Н.В. Барановский // Химическая физика и мезоскопия. – Ижевск: Удмуртский научный центр УрО РАН, 2011. – Том 13, №3. – С. 326-330.

3. Вилюнов В.Н. Теория зажигания конденсированных веществ. Новосибирск: Наука, 1984. – 187 с.

4. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983. С. 33-36.

5. 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. – Том 38, № 6. – С. 17-29.

6. Касперов Г.И. Исследование пожароопасных свойств лесных горючих материалов сосновых насаждений / Г.И. Касперов, П.Н. Гоман // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообрабатывающая промышленность, 2010. – Вып. XVIII. – С. 337-340.

nuczu.edu.ua

В.А. Гузенко, В.А. Самарин

Анализ условий зажигания слоя горючего материала сфокусированным потоком солнечного излучения

Проведено теоретическую оценку условий зажигания слоя лесного горючего материала сфокусированным потоком солнечного излучения. Рассмотрен сценарий воспламенения при отсутствии в слое лесного горючего материала влаги.

Ключевые слова: зажигание, лесной горючий материал, химическая реакция, стекло, сфокусированное солнечное излучение.

V.O. Samarin, V.A. Guzenko

Analysis of the conditions of ignition of combustible material layer by focused flow of sunlight

A theoretical assessment of the conditions of forest fuel ignition material by focused flow of sunlight. The scenario of inflammation in a layer of forest fuel at the absence moisture is considered.

Keywords: ignition, forest combustible material, chemical reaction, glass, focused solar radiation.