

*С.С. Щербак, нач. відділу, НУЦЗУ,
С.І. Азаров, д.т.н., с.н.с., зав. відділу, ІЯД НАН України,
Р.І. Шевченко, д.т.н., с.н.с., нач. відділу, НУЦЗУ*

МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ ВИНИКНЕННЯ ТА ПОШИРЕННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ ЗІ СКЛАДНИМИ РАДІАЦІЙНИМИ УМОВАМИ ФОРМУВАННЯ ПОЖЕЖНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

(представлено д.т.н. Тарасенком О.А.)

В роботі проведено систематизацію математичних моделей процесів виникнення та поширення лісових пожеж. Визначені основні напрями його подальшого застосування як методологічної основи прогнозування змін стану навколишнього середовища у зоні зі складними радіаційними умовами формування пожежного навантаження.

Ключові слова: моделювання, лісові пожежі, радіаційний вплив, на-вколишнє середовище.

Постановка проблеми. Аналіз протидії пожежам у природних екосистемах України протягом останніх 5 років [1] свідчить про значне збільшення пожеж у лісових масивах, на торфовищах, сільгоспугіддях та на відкритих ділянках місцевості. Найбільша кількість пожеж у лісових масивах виникла на території Київської (359), Луганської (353), Харківської (235), Дніпропетровської (227) та Житомирської (220) областей. Попре небезпеку прямої дії (небезпечні чинники пожежі) на населення та міську інфраструктуру, лісові пожежі спричиняють значний екологічний вплив.

Особливе занепокоєння викликає зростаюча динаміка пожеж у зоні відчуження Чорнобильської АЕС. На території якої, при оцінці негативних екологічних наслідків лісової пожежі, додатково необхідно враховувати зміни екологічної обстановки внаслідок міграції з продуктами горіння радіоактивних речовин. Підтвердженням гостроти існуючої проблеми є наявна статистика ДСНС України [2]. Так починаючи з 2015 року кількість лісових пожеж на території Чорнобильської зони відчуження і зони безумовного (обов'язкового) відселення щорічно вдвічі перевищує сталі середні показники більш ніж тридцятирічного спостереження. А площа, яка була пройдена вогнем, в окремі роки перевищувала середній показник більш ніж у 30 рази (2015 рік – 657 га, середній показник – 20 га).

Таким чином проблема формування методологічного апарату, який би дозволив адекватно оцінити негативний вплив на навколишнє середовище лісових пожеж в складних радіаційних умовах пожежного навантаження є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання моделювання процесів виникнення, поширення та припинення лісових пожеж досить широко розглянуто в робота відомих вітчизняних та зарубіжних вчених [3–12]. Це дало змогу сформувати на сьогоднішній день системну уяву щодо фізики протікання зазначених процесів [13] та розробити низку практи-

чних рекомендацій [14, 15] з підвищення ефективності заходів протипожежного захисту. Втім питання небезпечного впливу, насамперед в зоні зі складними радіаційними умовами формування пожежного навантаження, дослідженні на сьогодні епізодично. Зазначені процеси впливу не систематизовано. Відтак, задача систематизації наявного апарату моделювання процесів поширення лісової пожежі, з урахуванням умов подальшого спеціалізованого застосування є нагальною задачею наведеного дослідження.

Постановка завдання та його вирішення. Задачею дослідження є систематизація моделей процесів виникнення та поширення лісових пожеж в зоні зі складними радіаційними умовами формування пожежного навантаження.

Стохастичний характер процесів виникнення, розвитку і поширення лісових пожеж та варіювання ступеня горіння рослинності в лісових масивах, залежать від пожежної навантаги, сезону року та інших пожежотехнічних і метеорологічних факторів. Процеси виникнення та розвитку лісової пожежі умовно можна поділити на три фази: займання та наростання пожежі, стаціонарне горіння розвинутої пожежі, згасання [3]. Характер і фази розвитку лісової пожежі можна описати за допомогою залежності середньої температури продуктів горіння від часу. Простір, де лісова пожежа виникла та розвивається, буде характеризуватися наявністю зон горіння, теплової дії та задимлення. Лісова пожежа починається із займання, тобто виникнення досить потужного джерела запалювання та, при наявності запасів горючих лісових речовин, локального гомогенного кінетичного полум'яного горіння.

Для того, щоб розпочалося горіння, повинно утворитися досить потужне джерело запалювання (наприклад, електростатичний або електричний розряд внаслідок блискавки, відкритий вогонь, іскри, розжарення поверхні, підпал і т.п.).

Займання може виникнути за таких умов [4]:

- 1) наявність запасів сухих горючих лісових речовин;
- 2) достатня температура та потужність джерела запалювання для початку термічного піролізу сухих горючих речовин з виділенням горючих газів та парів, з утворенням "горючого середовища" (тобто суміш газів або парів з киснем атмосферного повітря).

На початок фази стаціонарного горіння необхідно щоб сформувались [5]:

- зона лісової пожежі, форми, горизонтальні лінійні розміри та просторове розташування "запасів" горючих речовин;
- багатофакельне полум'я у зоні горіння та висхідна гілка димових газів;
- зона міграції димових газів у повітрі та шлейф можливого радіаційного опромінення населення.

Фаза згасання лісової пожежі настає в результаті майже повного вигорання запасів горючих лісових речовин або внаслідок різкого погіршення погодних умов, наприклад, дощу, зміни напрямку та швидкості вітру тощо.

В інформаційній моделі, що пропонується (рис. 1), ліс розглядається як одношарове двофазне середовище, що складається з повітря і газоподібних продуктів піролізу при горінні лісових горючих матеріалів та їх твердих продуктів піролізу (тверда фаза).

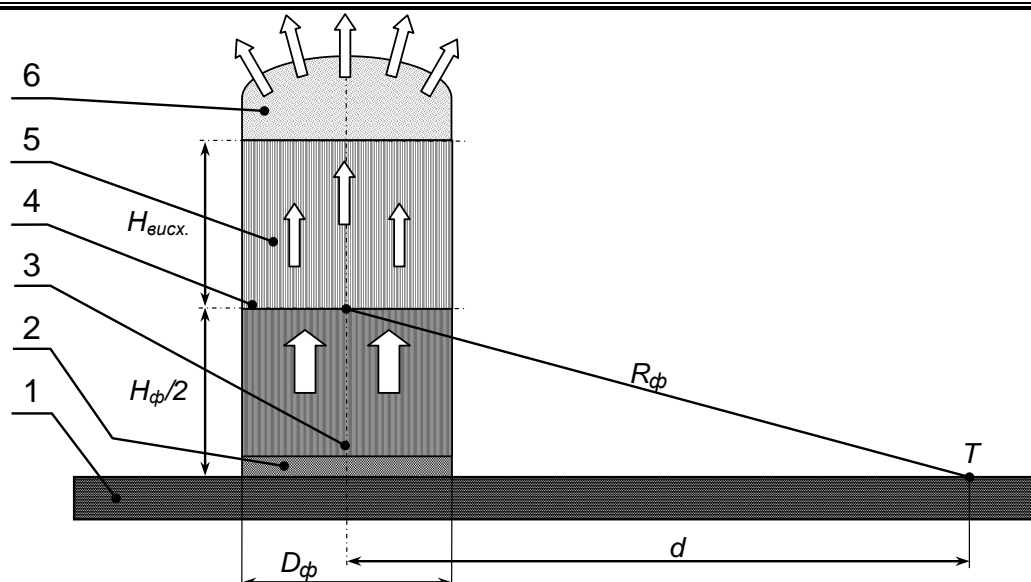


Рис. 1. Інформаційна модель лісової пожежі: 1 – земна поверхня; 2 – горючі лісові речовини у зоні пожежі (пожежна навантага); 3 – джерело лісової пожежі; 4 – багатофакельне полум'я пожежі; 5 – висхідна гілка димових газів; 6 – атмосферне повітря

При побудові фізико-математичної моделі двофазної гетерогенної суміші на основі методів механіки суцільного середовища така суміш представляється як двокомпонентний континуум з взаємопроникним рухом фаз та міжфазним обміном масою, імпульсом і енергією. Газова фаза є багатокомпонентним середовищем, яке складається з горючих газів (CO_2, N_2, CH_2 , тощо), негорючих газів (CO_2, N_2 та ін.), дисперсної сажі і окисника (O_2). При цьому припускаємо, що частки дисперсної сажі рухаються разом з газовою фазою, і, при згорянні сажі, процес теплообміну проходить швидко та можна розглядати єдину температуру газової фази. Тверда фаза також являється багатокомпонентним середовищем, яке складається з лісних горючих матеріалів та продуктів їх піролізу – коксу і попелу. Система рівнянь двовимірної двофазної моделі лісової пожежі має наступний вигляд:

1) газова фаза у відповідності до [3, 4]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\rho v}{\partial y} &= Q - J_\rho; \\ \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial (\rho u^2 + \phi p)}{\partial x} + \frac{\partial \rho u v}{\partial y} &= \\ &= 2\rho \omega_z y - \rho c_d s u |V| + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + p \frac{\partial \phi}{\partial x} - J_u; \\ \frac{\partial p E}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u E + \phi p v)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v E + \phi p u)}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \\ - J_E + p \sum_{j=1}^m (R_{\phi j} / \rho_j) + \alpha (T_1 - T) - diwW - 4k\sigma_k T^4 + f_\Gamma + f_{\Gamma P} + Q_T; \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial p v}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2 + \phi p)}{\partial y} + \frac{\partial \rho u v}{\partial x} = \\
& = 2\rho\omega_z u - \rho c_d s v |V| + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + p \frac{\partial \phi}{\partial y} - J_v; \\
& \frac{\partial p C}{\partial t} + \frac{\partial \rho u C}{\partial x} + \frac{\partial \rho v C}{\partial y} = R_c - J_c + \frac{\partial}{\partial x}(\rho D_c \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho D_c \frac{\partial C}{\partial y}); \\
& \frac{\partial p C_{cd}}{\partial t} + \frac{\partial \rho u C_{cd}}{\partial x} + \frac{\partial \rho v C_{cd}}{\partial y} = R_{cd} - J_{cd}; \\
& p = p(\rho, T, C);
\end{aligned}$$

2) тверда фаза у відповідності до [5–7]:

$$\begin{aligned}
& p_j \frac{\partial \phi_j}{\partial t} = R_{\phi_j}, j = 1, \dots, m; \\
& \frac{\partial}{\partial t} \sum_{j=1}^m \rho_j \phi_j C_{pj} T_1 = -p \sum_{j=1}^m (R_{\phi_j} / p_j) - \alpha(T_1 - T) + k_1 \sigma(T^4 - T_1^4) + Q_{T_1}
\end{aligned} \quad (2)$$

Нормувальні та балансні співвідношення:

$$\phi + \sum_{j=1}^m \phi_j = 1; \dots \sum_{j=1}^n C_j + C_{cd} = 1; \dots \sum_{j=1}^n R_j + R_{cd} = Q; \dots \sum_{j=1}^m R_{\phi_j} = -Q, \quad (3)$$

де $\rho, p, T, E, V = (u, v)$ – парціальна густина, тиск, температура, повна енергія і швидкість газової фази; ϕ – об'ємна частка газової фази; Q – швидкість надходження речовин у газове середовище за рахунок процесів у твердій фазі; Q_T – виділення тепла в газовій фазі за рахунок горіння газів і дисперсної сажі; $J_\rho, J_c, J_u, J_v, J_E$ – потік речовини, імпульсу та енергії на верхній та нижній границях шару лісових горючих матеріалів; $C = (C_1, C_2, \dots, C_3)$ – масові концентрації газових компонентів газової фази; C_{cd} – масова концентрація дисперсної сажі у газовій фазі; D_c – коефіцієнт дифузії; $R_c = (R_1, R_2, \dots, R_n)$ – швидкість зміни C_i в результаті хімічних реакцій; R_{cd} – швидкість зміни C_{cd} за рахунок хімічних реакцій; J_{cd} – зменшення концентрації дисперсної сажі на верхній та нижній межах шару лісових горючих матеріалів; $2\rho\omega_z v, -2\rho\omega_z u$, – компоненти сили Коріоліса; ω_z – кутова швидкість обертання Землі; $\rho c_d s u |V|$, $\rho c_d s v |V|$ – компоненти об'ємної сили, яка пов'язана з обміном імпульсом між фазами (сили між фазного тертя); c_d – емпіричний коефіцієнт опору рослинності; s – кутова поверхня лісових горючих матеріалів; τ – тензор турбулентних в'язких напруг; $\tau_{ik} = \mu_T \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_k} + \frac{\partial V_k}{\partial x_i} \right)$; μ_T – коефіцієнт турбу-

лентної в'язкості; $k_s = k + k_T$; k – коефіцієнт молекулярної теплопровідності у газі; k_T – коефіцієнт турбулентної теплопровідності; $\alpha(T_1 - T)$ – міжфазний теплообмін; α – коефіцієнт теплообміну; f_T – теплообмін на верхній та нижній границях шару ЛГМ; $\phi_j, j = 1, \dots, m$ – об'ємні частки компонентів твердої фази в об'ємі двофазного середовища; $\rho_j, j = 1, \dots, m$ – дійсні густини компонентів твердої фази, $\rho_j = \text{const}$; $c_{pj}, j = 1, \dots, m$ – теплоємність компонентів твердої фази; $R_{\phi j}, j = 1, \dots, m$ – швидкість зміни об'ємної частки ϕ_j ; T_1 – температура твердої фази; Q_{T_1} – тепловиділення у твердій фазі.

Оскільки випромінювання грає фундаментальну роль у розвитку та поширенні лісової пожежі, більшість теоретичних і експериментальних досліджень присвячено вивченню закономірностей запалювання, яке ініціюється променистим тепловим потоком. Розміри полум'я для лісової пожежі, можливо розрахувати скориставшись наближеною емпіричною формулою

$$H_f = 0,14 D_f \sqrt{q_0}, \quad (4)$$

де H_f – висота полум'я; D_f – діаметр осередку горіння, м; q_0 – питома теплота згорання лісової пожежної речовини.

В теперішній час існує два основних методи розрахунку променистого теплового потоку. За першим методом приймається, що випромінювання теплоти виходить від точкового джерела на осі полум'я на висоті $0,5 H_f$ над поверхнею лісової підстилки. Тепловий потік на відстані H_f від точкового джерела P_f визначається виразом:

$$q = \frac{0,3 q_0 S_{kr}}{4 R_\phi^2}, \quad (5)$$

де $R_\phi^2 = \left(\frac{H_\phi}{2} \right)^2 + d^2$ – відстань на осі факела до лісових насаджень.

При застосуванні другого методу полум'я апроксимується прямокутником $H_\phi \times D_\phi$, що тягнеться в гору. Потужність теплового випромінювання даного прямокутника складе [9]:

$$P_\phi = \frac{1}{2} \left(\frac{0,3 q_0 S_\phi}{H_\phi D_\phi} \right), \quad (6)$$

де S_ϕ – площа лісової пожежі, м².

Променистий потік в деякій точці може бути розрахований за формулою:

$$q_F = \varphi P_\phi, \quad (7)$$

де φ – коефіцієнт опромінювання.

Його значення для поверхонь різної форми та взаємного розташування можна взяти з відповідних таблиць і діаграм, які наводяться у довідниковій літературі [10,11].

Визначивши значення променистого потоку, що впливає на лісові насадження, можна визначити температуру, яка впливає на лісові масиви, за формулою [10]:

$$q_\phi = \delta_0 \psi_0 \varphi \left[\left(\frac{T_\phi}{100} \right) - \left(\frac{T_\lambda}{100} \right) \right]^4, \quad (8)$$

де δ_0 – приведений коефіцієнт випромінювання системи полум'я – поверхня, що опромінюється, $C_0 = 5,76 \varepsilon_{np}$; $\varepsilon_{np} = 1/(1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 + 1)$ – приведена ступінь полум'я – об'єкт, що опромінюється; ε_1 – ступінь чорноти факелу полум'я для системи; ε_2 – ступінь чорноти поверхні об'єкту; ψ_0 – коефіцієнт, що характеризує розміри полум'я; φ – коефіцієнт опромінюваності між випромінюванням і поверхнею, що опромінюється.

Отже:

$$T_\lambda = 100^4 \sqrt[4]{\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \frac{q_F}{C_0 \psi_0 \varphi}}. \quad (9)$$

У моделі перенесення енергії випромінюванням допускаємо, що випромінювання у фронті лісової пожежі локально рівноважне. Тоді перенесення променистої енергії у цій моделі здійснюється за рахунок механізму променистої теплопровідності, обумовленого наявністю дисперсних часток, де для потоку енергії випромінювання W використовується формула

$$W = -\frac{16\sigma l_s T^3}{3} \text{grad} T \quad (10)$$

і механізм перенесення випромінювання в оптично прозорому шарі, який описується членом $4\sigma_k T^4$; l_s – довжина пробігу випромінювання (характерна віддаль між дисперсними частками); k – коефіцієнт поглинання випромінювання у газі, σ_k – інтеграл від спектральної інтенсивності рівноважного випромінювання по спектру частот, для яких газову фазу можна вважати оптично прозорим середовищем; f_{GP} – обмін променистою енергією на верхній і нижній границях шару лісних горючих матеріалів; $k_1 \sigma (T^4 - T_1^4)$ – поглинання променистої енергії твердою фазою; k_1 – коефіцієнт поглинання випромінювання твердою фазою; σ – постійна Стефана-Больцмана.

Фаза займання завершується в момент коли є перехід від полум'яного однофазного гомогенного горіння до дифузійного ламінарного полум'яного горіння, а також до дифузійно-турбулентного режиму, який характеризується подрібненням одного факела на кілька одночасно існуючих

факелів, що безперервно змінюють свою форму та лінійні горизонтальні розміри, поширюються поверхнею запалів горючих лісових речовин у зоні пожежі. Лінійна швидкість розповсюдження лісової пожежі залежить від швидкості вітру та визначається за емпіричною формулою:

$$V_l = K_w W_w^{0,7} \quad (11)$$

де K_w – коефіцієнт, який дорівнює 0,55; W_w – швидкість вітру.

Середня лінійна швидкість поширення фронту лісової пожежі за вітром визначається за формулою:

$$\bar{V}_l = \bar{K}_w K_r W^h \quad (12)$$

де \bar{K}_w – коефіцієнт, який дорівнює 3,33; K_r – коефіцієнт густини розподілу лісового горючого матеріалу ($0 < K_r \leq 0,9$).

Середню швидкість (кг/с) утворення димових газів у фазі розвинутої лісової пожежі можна визначити за формулою:

$$W_s = K_s \bar{V}_w, \quad (13)$$

де K_s – коефіцієнт, який дорівнює 0,932; \bar{V}_w – середня швидкість горіння деревини.

Швидкість вигорання деревини залежить від багатьох факторів: швидкості нагрівання, густини деревини, вологості, розташування поверхні горіння відносно напрямку теплового потоку. Середня швидкість вигорання сосни становить приблизно 4,5 мм/хв., ялини – 1,1 мм/хв. Деревина у фазі розвинутої лісової пожежі вигорає майже з постійною швидкістю. Температурний перепад для сосни досягає величини, починаючи з температури займання – 490 К, до температури порядку 1400 К, яка досягається при тривалій пожежі.

Тривалість фази розвинутої лісової пожежі (c^{-1}):

$$\tau = \frac{K_s m_w}{\bar{V}_w} \quad (14)$$

де m_w – маса деревини.

Швидкість виділення теплоти в основній фазі лісової пожежі (МДж/с) [11]:

$$q = \bar{V}_w (K_s Q_f + K Q_w) \quad (15)$$

де Q_f – теплота згорання летких речовин; Q_w – теплота згорання деревини; K – коефіцієнт, рівний 0,068.

Для замикання моделі лісової пожежі розглянемо:

- газову фазу, яка складається з 3-х компонентів: 1 – горючі гази (в основному CO , H_2 , CH_4), масова концентрація C_1 ; 2 – негорючі гази (N_2 , CO_2), масова концентрація C_2 ; 3 – окисник (O_2), масова концентрація C_3 ;

- тверду фазу, яка складається з 3-х компонентів: 1 – лісові горючі матеріали, об'ємна доля ϕ_1 ; 2 – коксик, об'ємна доля ϕ_2 ; 3 – попіл, об'ємна доля ϕ_3 ;

- сажа дисперсна, об'ємна доля ϕ_{cd} .

Продукти піролізу лісних горючих матеріалів – коксик и дисперсна сажа складаються з вуглецю. В якості базових хімічних реакцій розглянемо реакції піролізу лісних горючих матеріалів (R_0), горіння вуглецю (R_c) і горіння газів (R_{co}). Процесами дисоціації при характерних значеннях температури газової фази у фронті пожежі біля 1400 К можна знехтувати. Для величин R_0 , R_c , R_{co} використаємо формули [11]:

$$\begin{aligned}
 R_0 &= \rho_1 \phi_1 k_0 \exp\left(-\frac{E_o}{RT_1}\right) \\
 \frac{E_o}{R} &= 9400 \text{ К}, \dots k_0 = 3,63 \cdot 10^4, \text{ с}^{-1} \\
 R_c &= \frac{M_c}{M_3} \rho C_3 k_c \exp\left(-\frac{E_c}{RT}\right) \\
 R_{co} &= \rho C_1 k_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) \\
 E_1 &= 96800 \text{ Дж/моль}; R = 8,3144 \text{ кДж/(моль} \cdot \text{К)}, \\
 k_1 &= 7,05 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}.
 \end{aligned} \tag{16}$$

Тоді члени, які описують зміну маси та енергії за рахунок хімічних реакцій, визначаються за формулами [11]:

$$\begin{aligned}
 Q &= (1 - \alpha_c - \alpha_{as}) R_0 + \phi_2 s_2 R_c + s_{cd} R_c; \\
 R_1 &= (1 - \alpha_c - \alpha_{as}) \alpha_1 R_0 - R_{co}; \\
 R_2 &= (1 - \alpha_c - \alpha_{as}) (1 - \alpha_1) R_0 - R_{co} + \phi_2 s_2 R_c + s_{cd} R_c; \\
 R_3 &= -R_c; \\
 R_{fl} &= -R_0; \\
 R_{f2} &= \alpha_c R_0 - \phi_2 s_2 R_c; \\
 R_{f3} &= \alpha_{ac} R_0; \\
 R_{cd} &= \alpha_{as} R_0 - R_c; \\
 Q_T &= q R_{co} + q_1 R_c,
 \end{aligned} \tag{17}$$

де M_c – молекулярна маса вуглецю ($M_c = 12$); M_3 – молекулярна маса окисника (O_2), ($M_3 = 32$); E_0, E_1, E_c – енергії активації; k_0, k_1, k_c – константи хімічних процесів; α_c – коксове число або частка коксика при піролізі лісних

горючих матеріалів; α_{as} – частка попелу, що утворюється при піролізі лісних горючих матеріалів; $(1 - \alpha_c - \alpha_{as})$ – частка газів при піролізі лісних горючих матеріалів; α_1 – частка горючих газів серед газів, що утворюються при піролізі лісних горючих матеріалів; $(1 - \alpha_1)$ – частка негорючих газів, що утворюються при піролізі лісних горючих матеріалів; $s^2(\text{м}^{-1})$ – питома поверхня коксика; q – теплота горіння газів; q_1 – теплота горіння вуглецю (коксика і сажі); $\alpha_c R_0$ – масова швидкість утворення коксика під час піролізу лісних горючих матеріалів; $\alpha_{as} R_0$ – масова швидкість утворення попелу під час піролізу лісних горючих матеріалів; $(1 - \alpha_c - \alpha_{as}) R_0$ – масова швидкість утворення газів під час піролізу лісних горючих матеріалів; $\phi_2 s_2 R_c$ – масова швидкість вигорання коксика і утворення газів при горінні.

Із застосуванням наведеного математичного апарату проведено моделювання низової лісової пожежі хвойних лісів. Розрахунки основних характеристик у залежності від маси лісних горючих матеріалів, що згоріли, наведені в табл. 1.

Табл. 1. Результати моделювання низової лісової пожежі при одночасному займанні лісних горючих матеріалів в залежності від їх маси

Маса лісових горючих матеріалів, m_0 , кг	0,1	0,5	1,0
Площа лісових горючих матеріалів, S_0 , га	0,1	0,5	1,0
Теплота згорання лісових горючих матеріалів, Q_T , МДж	1,0	5,5	10
Потік променистої енергії, I_ϕ , МВт/м ²	8,0	14,0	19,0
Діаметр полум'я, D_ϕ , м	30	60	120
Висота полум'я, H_ϕ , м	60	100	170
Площа лісової пожежі, S_ϕ , м ²	$7 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^4$
Висота підняття димової хмари, H_ϕ , км	0,6	0,9	1,3
Радіус зони займання, R_ϕ , м	23,5	40,4	74,6
Маса СО в димовій хмарі, M_{CO} , кг	10^3	$5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$
Маса СО ₂ в димовій хмарі, M_{CO_2} , кг	500	1700	4900
Маса аерозолі в димовій хмарі, M_{aer} , кг	$2,5 \cdot 10^3$	$8,3 \cdot 10^3$	$29 \cdot 10^3$
Маса сажі в димовій хмарі, $M_{саж}$, кг	0,4	1,2	3,5

З аналізу результатів моделювання визначено, що тривалість життя димової хмари лісової пожежі у нижній тропосфері (до 1,5 км) менше тижня, у верхній тропосфері – місяць, у стратосфері – 1–3 роки, що є додатковим фактором, який впливає на міграцію радіаційного забруднення всередині та зовні зони відчуження Чорнобильської АЕС.

Висновки. Представлено математичні моделі процесів виникнення та поширення лісових пожеж в зоні зі складними радіаційними умовами формування пожежного навантаження в інтересах подальшого

прогнозування негативного впливу на навколишнє середовище. Визначено, що димові хмари, які виникають внаслідок лісової пожежі мають стійкий характер існування (від 1 тижня до 3 років) та є додатковим фактором міграції небезпечних забруднюючих речовин. В рамках всебічного розкриття теми небезпечного впливу лісових пожеж в зоні зі складними радіаційними умовами формування пожежного навантаження подальші дослідження повинні враховувати складний механізм утворення та перенесення димових мас.

ЛІТЕРАТУРА

1. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні // МНС України. Офіційний сайт. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.mns.gov.ua>
2. Аналітичний огляд стану техногенної та природної безпеки в Україні за 2018 рік МНС України. //Офіційний сайт. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.mns.gov.ua>
3. Абрамов Ю.А. Басманов А.Е., Тарасенко А.А. Вероятностная модель распространения и тушения лесного пожара // Проблемы пожарной безопасности. 2003. Вып. 13. С. 3–11.
4. Доррер Г.А. Математические модели динамических пожаров. М.: Лесная промышленность. 1979. 161 с.
5. Гришин А.М., Фильков А.И. Прогноз возникновения и распространения лесных пожаров. Кемерово: "Практика", 2005. 202 с.
6. Воробьев О.Ю., Валендин Э.Н. Вероятностное множественное моделирование распространения лесных пожаров. Новосибирск: Наука. 1978. 160 с.
7. Граб М.В. Модели, методы и алгоритмы распространения лесных пожаров: дис. канд. тех. наук: 01.05.02. 2004. 230 с.
8. Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука. 1977. 102 с.
9. Корнеев Д.Г. Математическое моделирование развития лесного пожара // Электронное моделирование. 1999. № 21(3). С. 84–94 с.
10. Конев Э.В. Анализ процесса распространения лесных пожаров и палов // Теплофизика лесных пожаров. 1984. № 6. С. 99–125 с.
11. Оценки условий и параметров развития лесных пожаров. Методические рекомендации. Ленинград: ЛенНИИЛХ. 1984. 100 с.
12. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Детерминированно-вероятностный прогноз лесопожарных возгораний // Пожаровзрывобезопасность. 2006. № 5. С. 56–59.
13. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е., Тарасенко А.А. Моделирование пожаров, их обнаружения, локализации и тушения. Харьков: НУГЗУ, 2011. 927 с.
14. Абрамов Ю.А., Тарасенко А.А. Формулировка задачи оптимизации параметров управленческих решений для ликвидации ландшафтного пожара // Проблемы пожарной безопасности. 2006. Вып. 20. С. 207–209.

15. Абрамов Ю.А., Тарасенко А.А. Формирование априорной информации для системы ликвидации последствий чрезвычайной ситуации // Проблемы надзвичайних ситуацій. 2007. Вип. 6. С. 11–22.

Отримано редколегією 10.10.2019

С.С. Щербак, С.И. Азаров, Р.И. Шевченко

Модели процессов возникновения и распространения лесных пожаров в сложных условиях формирования пожарной нагрузки

В работе проведена систематизация математических моделей процессов возникновения и распространения лесных пожаров. Определены основные направления его дальнейшего применения в качестве методологической основы прогнозирования изменений состояния окружающей среды в зоне со сложными радиационными условиями формирования пожарной нагрузки.

Ключевые слова: моделирование, лесные пожары, радиационное воздействие, окружающая среда.

S. Scherbak, S. Azarov, R. Shevchenko

Models of processes of occurrence and spread of forest fires in complex conditions of fire load formation

The paper deals with the systematization of mathematical models of the processes of occurrence and spread of forest fires. The main directions of its further application as a methodological basis for predicting changes in the state of the environment in a zone with complex radiation conditions of fire load formation are determined.

Keywords: modeling, forest fires, radiation exposure, environment.