

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕЧНОГО СТАНУ ЛІСУ НА РІВНИНІ

У роботі запропоновано динамічну математичну модель пожежонебезпечного стану лісу на основі диференціального рівняння висушування та рівняння теплопровідності. Модель побудована на рівні окремих дерев та враховує процеси радіаційного та конвективного теплообміну, їх зміни протягом доби та року відповідно до просторової структури лісу, породного складу, віку, геометричних параметрів дерев та їх розміщення, метеорологічних та мікрокліматичних параметрів під наметом, термодинамічних характеристик лісового горючого матеріалу

Ключові слова: лісова пожежа, модель пожежної безпеки лісу.

Здатність до займання та інтенсивного горіння лісового горючого матеріалу (ЛГМ) залежить від його вологовмісту. Найчастіше займається та виступає провідником горіння лісова підстилка. Тому її вологість відіграє важливу роль при дослідженні пожежної безпеки лісів. Відомою є залежність здатності до займання лісової підстилки від різноманітних джерел при різній вологості [1]. Процес висушування наземного шару ЛГМ відбувається за відсутності опадів під впливом фізичних процесів тепломасообміну. На сьогодні відома низка моделей висушування лісових горючих матеріалів та капілярно-пористих тіл. Ці моделі [2-4] розроблені із застосуванням рівнянь математичної фізики. Вони є громіздкими, містять значну кількість різноманітних параметрів і тому широко не застосовуються у практичній діяльності. Крім того, вони не дають можливості характеризувати пожежну безпеку лісів. В той же час відомі значно простіші моделі [5], які описують процес висушування і можуть застосовуватися для моделювання пожежонебезпечного стану ЛГМ. Зокрема, у [6] на основі модернізованої моделі висушування запропоновано визначення з її допомогою стану пожежної безпеки. Одержано рекурентну формулу, яка дає можливість за метеорологічними даними, визначеними декілька разів упродовж доби, визначати вологість лісового горючого матеріалу. Проте запропонована модель потребує коефіцієнта висушування, який визначається експериментально для кожного виду лісового горючого матеріалу і не враховує процесів радіаційного та конвективного теплообміну, перебіг яких залежить від локальних параметрів лісу. У зв'язку з цим необхідно удосконалити модель, врахувавши не лише метеорологічні, а і мікрокліматичні параметри під наметом та властивості горючого матеріалу.

Метою роботи є розробка динамічної моделі пожежонебезпечного стану лісового горючого матеріалу на основі рівнянь висушування та теплопровідності з урахуванням як погодних умов, так і природних факторів.

Рівняння, яке описує процес висушування [5], має вигляд

$$\frac{dw}{d\tau} = -k(w - w_p), \quad (1)$$

де w – вологість матеріалу, %, визначена в момент часу τ , с; w_p – його рівноважна вологість, %; k – коефіцієнт висушування, с^{-1} . Рівноважну вологість можна визначити з метеорологічних умов за емпіричною формулою [7], яка найточніше описує залежність рівноважної вологості від температури та відносної вологості повітря

$$w_p = \frac{m_s}{1 + n \left(\frac{100}{\varphi} - 1 \right)^{i/3}} \cdot 100, \quad (2)$$

де φ – відносна вологість повітря, %, а коефіцієнти m_s , n та i залежать від його абсолютної температури T , К та описуються емпіричними формулами

$$m_s = -5,8964 \cdot 10^{-7} T^2 - 0,00009736 T + 0,40221, \quad (3)$$

$$n = -2,1825 \cdot 10^{-6} T^2 + 0,018552 T - 2,6939, \quad (4)$$

$$i = 2,0637 \cdot 10^{-6} T^2 - 0,0016742 T + 2,2885. \quad (5)$$

Коефіцієнт висушування записується у вигляді

$$k = \gamma N, \quad (6)$$

де N – швидкість висушування, %/с; γ – відносний коефіцієнт висушування, 1/%, який визначається за емпіричною формулою $\gamma = \frac{1,8}{w_0}$, w_0 – початкова вологість, %. Швидкість висушування

залежить від періоду висушування. Перший період характеризується сталою швидкістю висушування та температурою. Під час другого періоду відбувається зменшення швидкості висушування та зростання температури. Оскільки лісова підстилка складається з опалого матеріалу, який частково розкладений та може неодноразово зволожуватися внаслідок опадів, то можна вважати, що висушування відбувається протягом першого періоду. У цьому випадку швидкість висушування можна знайти з формули

$$q = r \frac{N}{100} R_v \rho_0, \quad (7)$$

де q – тепловий потік, Вт/м², r – питома теплота випаровування, Дж/кг, R_v – характерний розмір (відношення об'єму до площі поверхні), м, ρ_0 – густина матеріалу, кг/м³. Звідси швидкість висушування залежить від теплового потоку, характерного розміру та густини і буде становити

$$N = \frac{100q}{rR_v\rho_0}. \quad (8)$$

Тепловий потік q , який потрапляє на лісову підстилку, має дві основні складові – радіаційну q_r , яка є наслідком сонячного випромінювання, і конвективну q_c , яка характеризує перенесення тепла внаслідок переміщення повітряних мас. Радіаційний тепловий потік на горизонтальну поверхню відкритого простору також можна подати у вигляді двох окремих складових – прямого потоку сонячних променів $q_{пр}$ і розсіяного потоку $q_{розс}$.

Прямий потік сонячної радіації на горизонтальну поверхню обчислюється за формулою [8]

$$q_{пр} = q_{c0} P^m \sin h, \quad (9)$$

де q_{c0} – сонячна стала ($q_{c0} = 1353$ Вт/м²), P – коефіцієнт ослаблення променів атмосферою, m – відношення мас повітря і h – кут підйому сонця над горизонтом, рад. Значення P залежно від стану неба та від висоти над рівнем моря може змінюватися від 0,4 до 0,8 та вибирається 0,6 відповідно до рекомендацій [9, 10]. Відношення мас повітря m – це відношення шляху, який проходять в атмосфері сонячні промені до такого ж шляху, якщо сонце перебувало б у зеніті, та обчислюється за формулою

$$m = \frac{1}{\sin z}, \quad (10)$$

де z – зенітний кут, рад., $z = \frac{\pi}{2} - h$.

Величина кута підйому Сонця визначається за формулою

$$h = \arcsin(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos(15^\circ \cdot (t - 12))), \quad (11)$$

де φ – географічна широта місцевості, δ – схилення сонця, t – час доби у годинах. Схилення Сонця має річний період та досягає максимуму в день літнього сонцестояння ($\delta = 23,45^\circ$), мінімальним є у день зимового сонцестояння ($\delta = -23,45^\circ$), а нульовим – у дні весняного та осіннього рівнодення. Тому його можна описати формулою

$$\delta = \delta(d) = 23,45^\circ \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T}(d - 80)\right), \quad (12)$$

де d – день від початку року, $T=365$ днів – період.

Прямий радіаційний тепловий потік залежить від стану неба та закриття сонця хмарами. Таке ослаблення описується коефіцієнтом хмарності k_{xm} , який характеризує стан неба у кожен момент часу для кожної точки простору.

Розсіяний тепловий потік сонячної радіації, який потрапляє на горизонтальну поверхню, можна вважати ізотропним та визначати за формулою [9, 11]

$$q_{розс} = q_{c0}(0,271 - 0,294P^m). \quad (13)$$

Оскільки розглядається випромінювання на горизонтальну поверхню, то відбитим від неї тепловим потоком можна знехтувати.

Під наметом деревостану радіаційний тепловий потік складається [12] з прямого потоку, який проходить через прогалини у наметі та кронах та розсіяного, до складу якого входять зовнішній розсіяний потік, який потрапляє через прогалини, та відфільтровані листям (хвоєю) прямий та розсіяний потоки. При цьому можна знехтувати багаторазовим відбиттям та заломленням променів. Прямий потік під наметом зумовлений проекцією на нього відкритих ділянок намету та описується доповненням площі поверхні під наметом до її затінених частин. Окрім того, внаслідок коливань листя окремі промені проходять на поверхню через крону в певні моменти часу, внаслідок чого на ній спостерігаються окремі відблиски. Наявність або відсутність прямого потоку під наметом можна описати за допомогою функції $k_T(x, y, \tau)$, яка на основі геометричного розрахунку затінення визначає для кожної точки (x, y) у момент часу τ її освітлення прямим потоком ($k_T = 1$) або затінення ($k_T = 0$). Оскільки розсіяний потік під наметом потрапляє на горизонтальну поверхню не з усієї небесної півсфери, а проходить через прогалини, його потрібно брати з коефіцієнтом пропускання $k_{проп} = k_{проп}(k_3)$, де k_3 – зімкнутість крон, тобто величина, яка характеризує відношення площі горизонтальної проекції крон до площі ділянки лісу. Залежність між зімкнутістю крон та коефіцієнтом пропускання інтегральної сонячної радіації A_i (%) визначається з емпіричної формули

$$\lg A_i = x \lg a + b_1, \quad (14)$$

у якій x – сумарна площа прогалин у наметі, %, а коефіцієнти $\lg a$ та b_1 становлять: для хвойних деревостанів 0,015 та $-0,090$, для листяних 0,102 та 0,398 [11]. До прогалин у наметі додамо прогалини у кронах, які залежать від ажурності крон. Враховуючи коефіцієнт ажурності крон $k_{аж}$, який залежить від породи та зімкнутості деревостану, маємо

$$x = (1 - k_3 + k_{аж} k_3) \cdot 100. \quad (15)$$

З урахуванням (14)-(15) коефіцієнт розсіяння у частках одиниці обчислюється за формулою

$$k_{проп} = \frac{10^{100(1-k_3+k_{аж}k_3)\lg a+b_1}}{100} = 10^{100(1-k_3+k_{аж}k_3)\lg a+b_1-2}. \quad (16)$$

Формула (16) визначає пропускання при положенні сонця під кутом 45° до горизонту.

При інших значеннях h вводять коефіцієнт поправки, який описується величиною $\frac{\sin h}{\sin \frac{\pi}{4}}$. У

випадку закритого хмарами неба поправку не вводять. Для ділянки лісу з нерівномірним розташуванням дерев зімкнутість крон можна визначати і локально. У цьому випадку у формулі (16) береться відповідне значення.

Сонячна радіація під наметом на узліссі буде відрізняться від місця всередині лісу, оскільки прямі та розсіяні промені надходять не лише через прогалини у наметі, а і зі сторони відкритого простору. Особливо відчутною така різниця є на несправжніх узліссях, вздовж

доріг, поруч зі зрубками, на галявинах, які пропускають промені до пологів, особливо у випадку розташування з південного боку. Оскільки площа просвітів для потрапляння сонячної радіації зростає, то для таких ділянок її слід враховувати у коефіцієнті зімкнутості, який повинен становити не більше 50 % для межі узлісся. Якщо узлісся заросло деревами нижніх ярусів та кущами, їх крони створюють тінь та ослаблюють проникнення променів. Це ослаблення також можна врахувати у коефіцієнті зімкнутості. У загальному випадку при визначенні $k_{\text{проп}}$ у кожній точці лісу замість $1-k_3$ слід брати відношення суми тілесних кутів, крізь які видно прогалини, до тілесного кута півсфери. Коефіцієнт пропускання листяних деревостанів знає значних сезонних змін, пов'язаних з тривалістю вегетаційного періоду. Для соснових лісів такий вплив менш помітний. Проте у випадку листяних лісів в літні місяці спостерігається істотне ослаблення радіації під наметом. Його можна описати за допомогою коефіцієнта сезонності $k_{\text{сез}}$, значення якого залежить від клімату, місяця та породи дерева. Опадання листя можливе також внаслідок посухи, пошкодження пожежами та хвороб дерев. В останніх двох випадках може опадати і хвоя.

Радіаційний тепловий потік під наметом не лише поглинається поверхнею підстилки, а і відбивається від неї. Тому для прямого та розсіяного потоків потрібно використовувати коефіцієнт $(1-A)$, де A – альbedo поверхні, яке залежить від складу матеріалу поверхні та його властивостей.

Конвективний тепловий потік обчислюється за формулою

$$q_c = \alpha(T - T_{n0}), \quad (17)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К), T – температура повітря, К, T_{n0} – температура поверхні підстилки, К. Коефіцієнт тепловіддачі на межі тверде тіло-повітря залежить від швидкості повітряних мас біля поверхні та описується формулою [12]

$$\alpha = 5,6 + 4v_b, \quad (18)$$

де v_b – швидкість вітру, м/с.

Таким чином, з урахуванням (4)-(11) рівняння (1) набуде вигляду

$$\frac{dw}{d\tau} = -k(\tau)(w - w_p), \quad (19)$$

у якому коефіцієнт $k(\tau)$ визначається за формулою

$$k(\tau) = \gamma \frac{100((1-A)(k_{\text{т}}k_{\text{хм}}q_{\text{пр}} + k_{\text{проп}}k_{\text{сез}}(k_{\text{хм}}q_{\text{пр}} + q_{\text{розс}})) + \alpha(T - T_{n0}))}{rR_v\rho_0}, \quad (20)$$

та повинен бути додатнім. У випадку від'ємних значень вважаємо, що $k(\tau) = 0$. Початковою умовою є вологість підстилки в початковий момент часу

$$w(0) = w_0, \quad (21)$$

яку будемо вважати сталою.

Температура поверхні підстилки $T_{n0}=T(\tau, 0)$ обчислюється з рівняння теплопровідності у підстилці

$$\frac{\partial T_n}{\partial \tau} = \frac{1}{c\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T_n}{\partial z} \right), \quad (22)$$

де T_n – температура підстилки, К, у момент часу τ , с, на глибині z , м; c – теплоємність, Дж/(кг·К), ρ_0 – густина, кг/м³ та λ – теплопровідність підстилки, Вт/(м²·К). Початковою умовою є температура по товщині підстилки на початку вимірювань

$$T_n(0, z) = T_0, \quad (23)$$

яку будемо вважати сталою а граничними є умова, яка характеризує теплообмін на поверхні

$$\frac{\partial T_n}{\partial \tau}(\tau, 0) = -\alpha(T_n - T) + (1-A)(k_{\text{т}}k_{\text{хм}}q_{\text{пр}} + k_{\text{проп}}k_{\text{сез}}(k_{\text{хм}}q_{\text{пр}} + q_{\text{розс}})) \quad (24)$$

та відсутність теплового потоку між підстилкою та ґрунтом на глибині R_v

$$\frac{\partial T_n}{\partial \tau}(\tau, R_v) = 0. \quad (25)$$

Сталими параметри моделі для даного місця лісу є $w_0, T_0, \gamma, \rho_0, R_v, A, k_3, \lambda, c, q_{\text{пр}}, q_{\text{розс}}, k_{\text{проп}}$. При фіксованому дні у році для даного місця залежними від часу є величини $k_{\text{хм}}, h, T, w_p, T_{n0}, k_T, \alpha$, причому, окрім часу, значення w_p залежить від мікрокліматичних параметрів під наметом – температури T та відносної вологості повітря φ , α – від швидкості вітру, k_T – від структури лісу та його параметрів (породного складу, віку, повноти, густоти, ярусності та ін.). З метою уточнення (але і ускладнення) моделі можна також вважати залежними від вологості підстилки такі величини, як λ, c , та ρ_0 .

Робота моделі на інтервалі часу $[0, \tau_k]$ описується алгоритмом, наведеним на рис. 1.

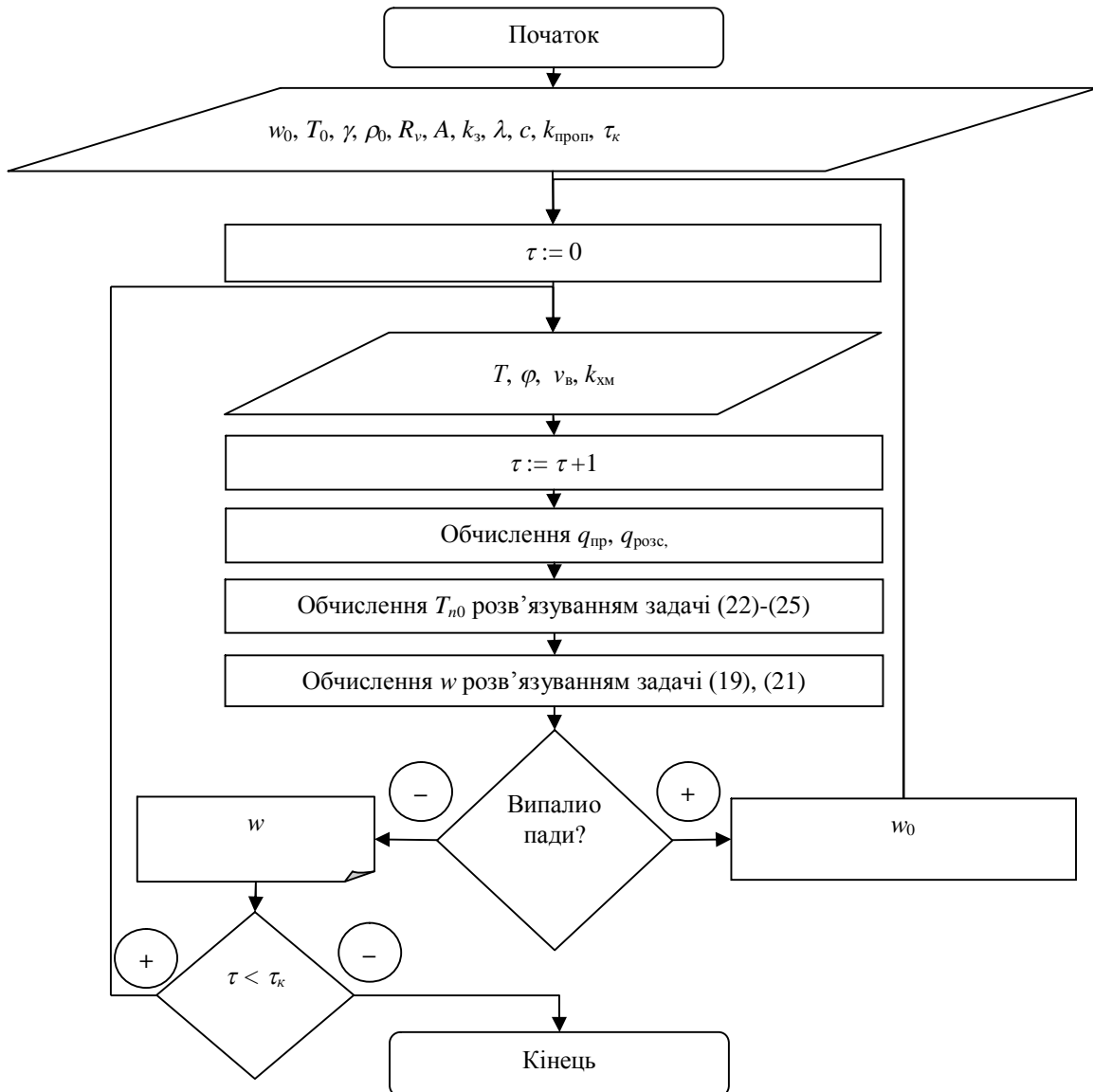


Рис. 1. Алгоритм динамічної моделі пожежонебезпечного стану лісу

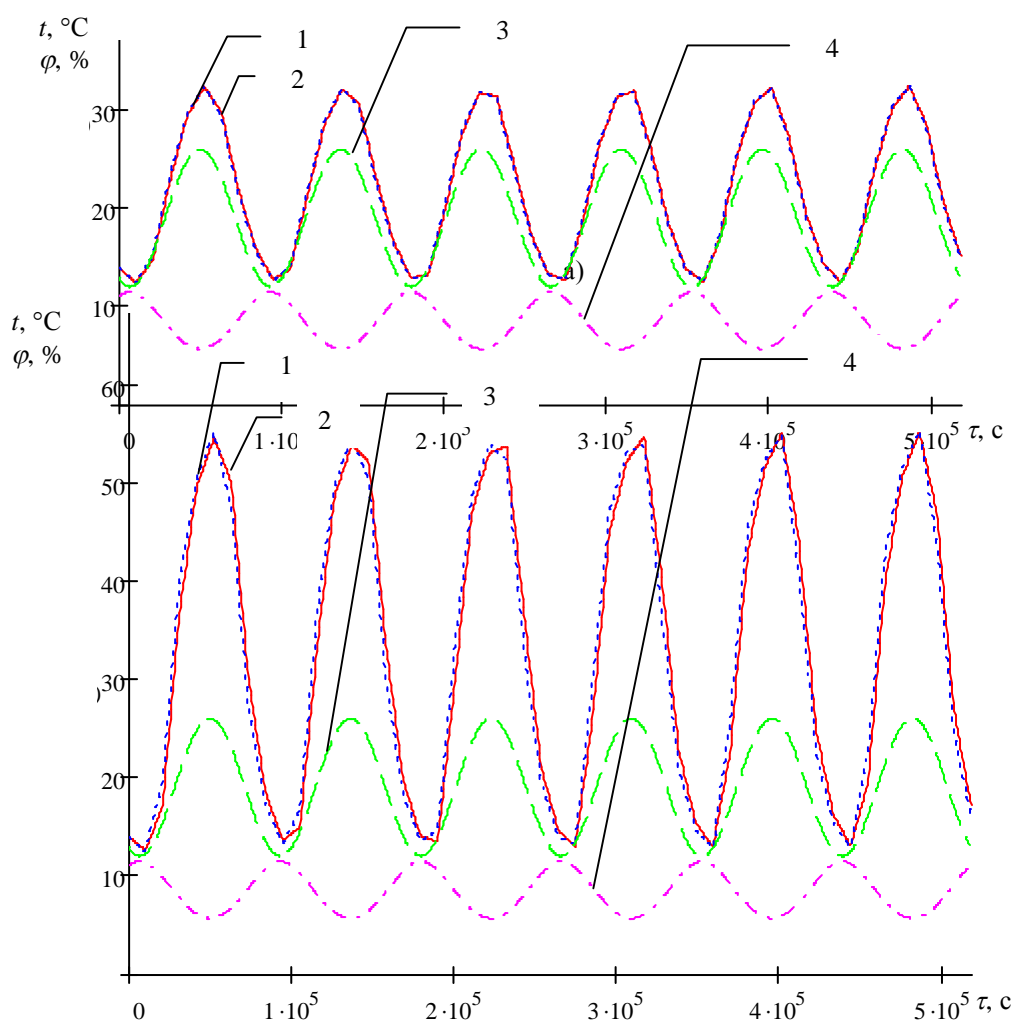
Розв'язання рівнянь моделі здійснюється чисельними методами. Важливим параметром моделі є початкова вологість підстилки w_0 . За відсутності опадів вона використовується лише у початковій умові (21). При випаданні опадів відбувається зволоження підстилки. Тому після опадів обчислення слід починати спочатку, взявши відповідне значення w_0 .

Перевірку роботи моделі виконано для різноманітних умов інсоляції та за відсутності опадів протягом 6 діб починаючи з 200-го дня року. Оскільки протягом декількох днів температура повітря та відносна вологість зазнають добових коливань та є обернено-пропорційними залежностями, а річними коливаннями можемо знехтувати, ці величини подамо у вигляді

$$T(\tau) = 292 + 7 \sin\left(\frac{2\pi}{24 \cdot 3600}(\tau - 8 \cdot 3600)\right), \quad (26)$$

$$\varphi(\tau) = 45 + 15 \sin\left(\frac{2\pi}{24 \cdot 3600}(\tau - 8 \cdot 3600) + \pi\right). \quad (27)$$

Графіки температури хвойної підстилки товщиною 0,05 м та густиною $\rho_0=50 \text{ кг/м}^3$ для лісу з коефіцієнтом зімкнутості деревостану 0,5, одержані внаслідок розв'язання задачі (22)-(25) для деяких погодних умов, наведені на рис. 2.



б)

Рис. 2. Графіки зміни температури підстилки
 а) за відсутності вітру, $k_{xm}=0,1$; б) швидкість вітру 0,5 м/с, $k_{xm}=0,7$
 (1 – температура поверхні підстилки, 2 – температура підстилки на глибині 7 мм,
 3 – температура повітря, 4 – відносна вологість повітря)

Відповідно до вказаних вище умов, на рис 3 наведено графіки, які відображають динаміку зміни вологості підстилки.

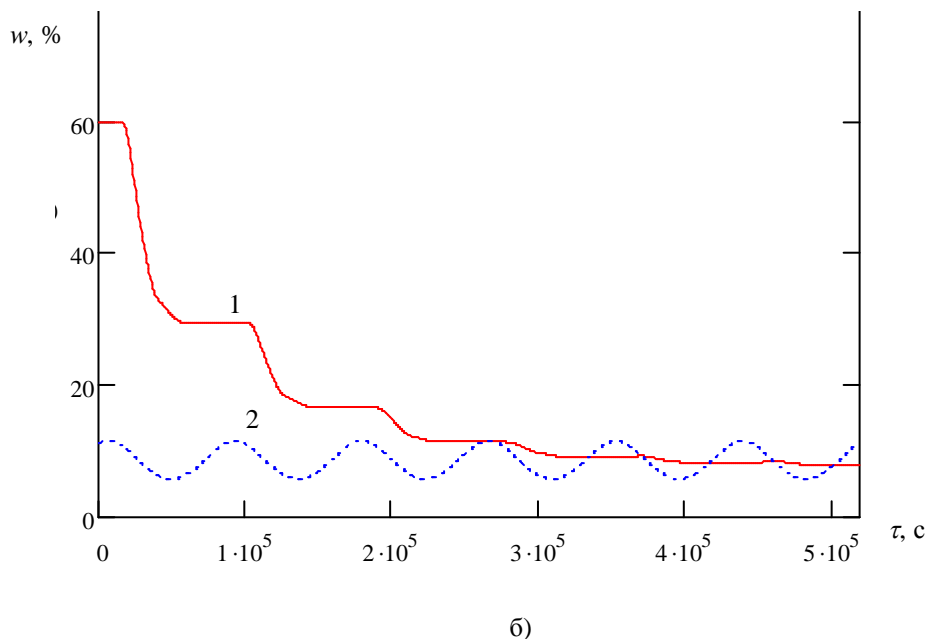
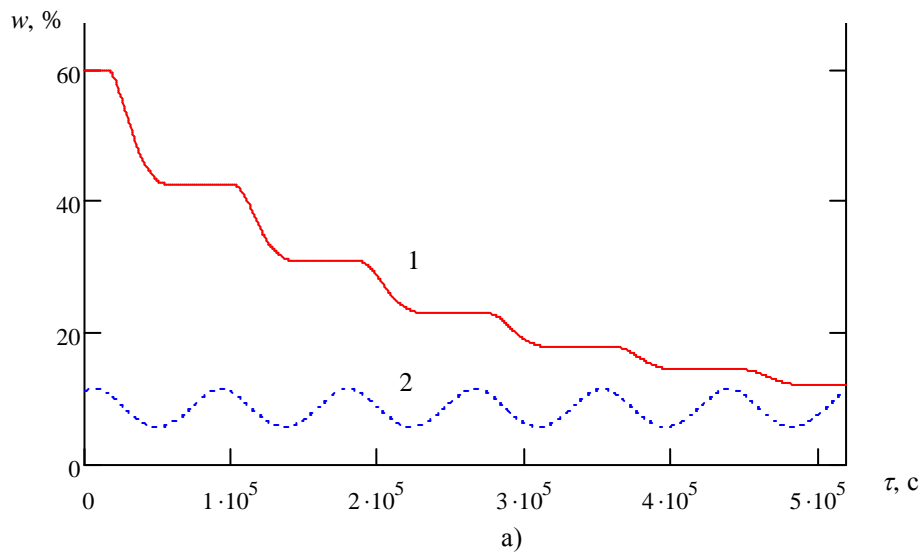


Рис. 3. Графіки зміни вологості підстилки при початковій вологості 40%
 а) за відсутності вітру, $k_{хм}=0,1$; б) швидкість вітру 0,5 м/с, $k_{хм}=0,7$
 (1 – вологість підстилки, 2 – рівноважна вологість підстилки)

Зауважимо, що коефіцієнт $k(\tau)$, який використовується у рівнянні (19) при знаходженні залежності вологості хвойної підстилки, наведеної на рис. 3 а), не перевищує $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1} = 0,058 \text{ год}^{-1}$, а на рис. 3 б) – $5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1} = 0,18 \text{ год}^{-1}$ та є близьким до наведеного в [14], який становить $0,079 \text{ год}^{-1}$.

Для інших параметрів лісу та погодних умов можна одержати відповідні залежності вологості підстилки від часу. Для реальних умов замість (26) та (27) слід застосовувати спостережні значення температури та відносної вологості повітря, швидкість вітру вважати функцією часу, а коефіцієнт хмарності замінити функцією, яка описує стан неба у кожен момент часу. У випадку високого коефіцієнта зімкнутості деревостанів замість температури по-

вітря та відносної вологості слід використовувати відповідні мікрокліматичні показники, або вводити відповідні поправки.

Висновки

1. Запропонована динамічна модель враховує як метеорологічні, так і мікрокліматичні параметри, які формуються під наметом під впливом сонячної радіації з урахуванням структури та параметрів лісу, та характеризує пожежну небезпеку в кожен момент часу в кожній точці поверхні через її вологість.

2. Використання моделі є доцільним у поєднанні з екологічними моделями, які відображають динамічний розвиток лісу, та дозволяють, моделювати вплив погодно-кліматичних умов та лісівничих заходів на пожежну небезпеку. Таке поєднання дасть змогу прогнозувати пожежну небезпеку в часі за наявності змін у стані лісу, зумовлених як природними факторами, так і діяльністю людини.

3. Динамічна модель придатна для застосування у різноманітних геоінформаційних системах, які інформують про небезпеку пожеж у лісах.

Список літератури:

1. **Stevens W. R.** Stickel on the measurement and interpretation of forest-fire weather in the Western Adirondacks / W. R. Stevens // *Monthly Weather Review*. – 1932. – January. – P. 25.

2. **Гришин А.М.** Математическое моделирование сушки слоя лесных горючих материалов / А. М. Гришин, Л. Ю. Катаева, Е. Л. Лобода // *Труды Международной конференции RDRAMM–2001*. – 2001. – Т. 6, Ч. 2, Спец. Выпуск. – С. 140-144.

3. **Постановка** и решение задачи о сушке слоя лесных горючих материалов / А.М. Гришин, А. М. Голованов, Л. Ю. Катаева, Е. Л. Лобода // *Физика горения и взрыва*. – 2001. – Т. 37, № 1. – С. 65-76.

4. **Федяев А.А.** Математическое моделирование динамики процессов тепловлажностной обработки капиллярно-пористых коллоидных дискретных материалов / А.А. Федяев, В.Н. Федяева, Ю.В. Видин // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. – 2008. – Vol. 1. – PP. 68-75.

5. **Лыков А.В.** Теория сушки / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – 472 с.

6. **Кузик А.Д.** Оцінювання пожежної небезпеки лісів за умовами погоди / А. Д. Кузик // *Науковий вісник НЛТУ України*. – 2011. – Вип. 21.1. – С. 74-81.

7. **Bastias M.V.** Evaluation of wood sorption models for high temperatures / V. V. Bastias, A. Cloutier // *Maderas. Ciencia y Tecnologia. Universidad del Bio-Bio Concepcion, Chile*. – 2005. – Vol. 7, numero 003. – PP. 145-158.

8. **Кондратьев К. Я.** Радиационный режим наклонных поверхностей / К. Я. Кондратьев, З. И Пивоварова, М. П. Федорова. – Л. : Гидрометеиздат, 1978. – 170 с.

9. **Hetrick W.A.** GIS-based solar radiation flux model / W. A. Hetrick, P. M. Rich, F. J. Branes, S. B. Weiss // *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers*. – 1993. – Vol. 3. – PP. 132-143.

10. **Chung U.** Solar irradiance-corrected spatial interpolation of hourly temperature in complex terrain / U. Chung, J. I. Yun // *Agriculture and forest meteorology*. – 2004. – Vol. 126. – PP. 129-139.

11. **Gates D. M.** Biophysical ecology / D. M. Gates. – New York: Springer-Verlag, 1980. – 629 PP.

12. **Цельникер Ю. Л.** Радиационный режим под пологом леса / Ю. Л. Цельникер. – М. : Наука, 1969. – 100 с.

13. **Кухлинг Х.** Физика / Х. Кухлинг. – М. : Мир, 1980. – 520 с.

14. **Phanphanich M.** Drying characteristics of pine forest residues / M. Phanphanich, S. Mani // *Bioresources*. – 2009. – Vol. 5(1). – P. 108-121.

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЖАРООПАСНОГО СОСТОЯНИЯ ЛЕСА НА РАВНИНЕ

В работе предложена динамическая математическая модель пожароопасного состояния леса на основе дифференциального уравнения высушивания и уравнения теплопроводности. Модель построена на уровне отдельных деревьев и учитывает процессы радиационного и конвективного теплообмена, их изменения в течение суток и года в соответствии с пространственной структурой леса, породным составом, возрастом, геометрическими параметрами деревьев и их размещением, метеорологическими и микроклиматическими параметрами под пологом, термодинамическими характеристиками лесного горючего материала

Ключевые слова: лесной пожар, модель пожарной опасности леса.

A.D. Kuzyk

DYNAMIC MODEL OF FOREST FIRE HAZARD IN THE PLAIN

The paper proposed a dynamic mathematical model of forest fire risk on the basis of the differential equation of drying and heat equation. The model is based on the level of individual trees and considers the processes of radiation and convection heat transfer, their changes during the day and, according to forest spatial structure, species composition, age, geometrical parameters of trees and their location, meteorological and microclimatic parameters under tent thermodynamic characteristics of forest fuel

Key words: forest fire, model of forest fire hazard

