

УДК (UDC) 630*43

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2020-22-06>

Ю. В. БУЦ¹, канд. геогр. наук, доц., О. В. КРАЙНЮК², канд. техн. наук, доц.,
А. Н. НЕКОС³, д-р геогр. наук, проф. В. В. БАРБАШИН⁴, канд. техн. наук, доц.

¹Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця
проспект Науки, 9А, м. Харків, Україна, 61000

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет
вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61000

³Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна
майдан Свободи, 4, м. Харків, Україна, 61000

⁴Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
вул. Маршала Бажанова, 17, м. Харків, Україна, 61002

e-mail: butsyura@ukr.net
alenauvarova@ukr.net
nekos@karazin.ua
barbachyn@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0450-2617>
<https://orcid.org/0000-0001-9524-040X>
<https://orcid.org/0000-0003-1852-0234>
<https://orcid.org/0000-0003-3262-8305>

ПІРОГЕННИЙ ВПЛИВ НА ХВОЙНІ ДЕРЕВОСТАНИ В УМОВАХ ТЕХНОГЕННО-ЕКОЛОГІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Мета. Розробка моделі впливу температури на стовбур дерева у залежності від тривалості впливу, відстані від кромки пожежі, від висоти пожежі.

Методи. Математичне моделювання.

Результати. Аналітичне дослідження теплопровідності зведено до вивчення просторово-часової зміни основної фізичної величини – температури. Вплив теплового випромінювання на деревостан відбувається при пожежах при висоті вогню 2–3 метри. У цьому випадку максимальний тепловий потік спрямований по горизонталі до деревостану і вражає крони хвойного підросту, спалюючи хвою, або перегріваючи хвою і бруньки, що призводить до загибелі молодих дерев. Дерев старшого віку отримують тільки опіки, що не призводить до їх загибелі, але знижується сортність деревини. У залежності від виду пожежі та її інтенсивності конвекційний тепловий потік відрізняється як за температурою, так і за тривалістю впливу на крону. Залежно від цих параметрів відбувається або опік усієї крони (бруньок, хвої), що призводить до загибелі дерева, або крона буде пошкоджена частково і залишиться життєздатною. Побудовано модель залежності температури на поверхні стовбура дерева від висоти пожежі і часу впливу пірогенного фактору. Встановлено, що навіть при низових пожежах щільність теплового потоку ближче 2 м від полум'я перевищує 12 кВт/м², такий рівень випромінювання заподіює опік моментально.

Висновки. Розроблено модель для прогнозу теплового випромінювання від вогню, що діє на стовбури дерев на різній відстані від кромки пожежі. Отримані результати дають можливість спрогнозувати післяпожежний стан деревостанів. Пошкодження стовбурів деревостанів і їх загибель при пожежах залежить також від товщини кори і часу впливу високих температур, а також від діаметра стовбура.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: лісові пожежі, теплове випромінювання, інтенсивність горіння, температура полум'я

Buts Y. V.¹, Krainyuk O. V.², Nekos A. N.³, Barbachyn V. V.⁴

¹Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics

²Kharkov National Automobile and Highway University

³V. N. Karazin Kharkiv National University

⁴Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

PYROGENIC INFLUENCE ON PINE STANDS IN THE CONDITIONS OF TECHNOGENIC AND ENVIRONMENTAL LOAD

© Буц Ю. В., Крайнюк О. В., Некос А. Н., Барбашин В. В., 2020



[This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0.](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Purpose. To develop a model of the effect of temperature on the tree trunk, depending on the duration of its impact, the distance from the edge of the fire and the height of the fire.

Methods. Mathematical modeling.

Results. The analytical study of thermal conductivity is reduced to the study of the space-time change of the basic physical quantity - temperature. The effect of thermal radiation on the stand is fires at a fire height of 2-3 meters. In this case, the maximum heat flow is directed horizontally to the stand and affects the crowns of coniferous undergrowth, burning needles, or overheating needles and buds, which leads to the death of young trees. Older trees receive only burns, which does not lead to their death, but reduces the quality of wood. Depending on the type of fire and its intensity, the convection heat flux differs in temperature and duration of exposure to the crown. Depending on these parameters, either the entire crown (buds, leaves, needles) burns, resulting in tree death, or the crown will be partially damaged and remain viable. The model of temperature dependence on the surface of the tree trunk on the height of the fire and the time of exposure of the pyrogenic factor is constructed. It is established that even in the case of grassroots fires, the heat flux density closer than 2 m from the flame exceeds 12 kW/m^2 , such a level of radiation causes burns immediately.

Conclusions. A model has been developed for the prediction of heat radiation from fire acting on tree trunks at different distances from the edge of the fire. The obtained results make it possible to predict the post-fire condition of stands. Damage to tree trunks and their death in fires also depends on the thickness of the bark and the time of exposure to high temperatures, as well as the diameter of the trunk.

KEYWORDS: forest fire, thermal radiation, combustion rate, flame temperature

Буц Ю. В.¹, Крайнюк Е. В.², Некос А. Н.³, Барбашин В. В.⁴

¹Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнеця

²Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

³Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина

⁴Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова

ПИРОГЕННОЕ ВЛИЯНИЕ НА ХВОЙНЫЕ ДРЕВОСТОИ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Цель. Разработка модели влияния температуры на ствол дерева в зависимости от длительности воздействия, расстояния от кромки пожара, от высоты пожара.

Методы. Математическое моделирование.

Результаты. Аналитическое исследование теплопроводности сведено к изучению пространственно-временного изменения основной физической величины – температуры. Влияние теплового излучения на древостой происходит при пожарах при высоте огня 2-3 метра. В этом случае максимальный тепловой поток направлен по горизонтали до древостоя и поражает кроны хвойного подроста, сжигая хвою, или перегревая хвою и почки, что приводит к гибели молодых деревьев. Деревья старшего возраста получают только ожоги, что не приводит к их гибели, но снижается сортность древесины. В зависимости от вида пожара и его интенсивности конвекционный тепловой поток отличается как по температуре, так и по продолжительности воздействия на крону. В зависимости от этих параметров происходит или ожог всей кроны (почки, хвой), что приводит к гибели дерева, или крона будет повреждена частично и останется жизнеспособной. Построена модель зависимости температуры на поверхности ствола дерева от высоты пожара и времени воздействия пирогенного фактора. Установлено, что даже при низовых пожарах плотность теплового потока ближе 2 м от пламени превышает 12 кВт/м^2 , такой уровень излучения причиняет ожог моментально.

Выводы. Разработана модель для прогноза теплового излучения от огня, действующего на стволы деревьев на разном расстоянии от кромки пожара. Полученные результаты дают возможность спрогнозировать состояние древостоев после пожара. Повреждения стволов древостоев и их гибель при пожарах зависит от толщины коры и времени воздействия высоких температур, а также от диаметра ствола.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: лесные пожары, тепловое излучение, интенсивность горения, температура пламени

Вступ

Вплив високих температур створених пірогенним чинником на лісові древостани не лише викликає їх істотне пошкодження, а й веде до загибелі рослин [1, 2, 3]. Вивчення пожежної небезпеки не повинно обмежуватися тільки прогнозною оцінкою [4], важливим також вважаємо оцінку збитку

заподіяного лісовою пожежею [5]. Отримано розрахунки результатів прогностичного моделювання постпірогенних міграційних геохімічних процесів в екогеосистемах [6, 7].

Щорічно природними пожежами знищуються або пошкоджуються тисячі гектарів лісового древостану. Суттєвим є

питання вивчення стійкості різних деревних порід до пірогенного впливу. Низові пожежі ушкоджують кору і камбій, що може викликати загибель дерева. Пошкодження деревостанів залежить від товщини кори, діаметру стовбура, особливостей виду, тощо. Пошкоджені вогнем дерева ослаблені і схильні до дії шкідників [1, 8, 9].

Найбільше під час пожежі пошкоджуються прикамбіальні тканини стовбурів, однак навіть при інтенсивному горінні вони можуть прогріватися і пошкоджуватися по-різному і не завжди призводять до загибелі дерева [10]. Для рослинних клітин небезпечним є не лише короточасний вплив летальних температур, що обумовлюють миттєву коагуляцію білка, але і тривала дія так званих сублетальних температур, що викликають порушення обміну речовин і фізіологічне ослаблення дерев [11, 12]. При підвищенні температури лубу і камбіальної зони спостерігається загибель частини клітин, що призводить до порушення їх упорядкованого розташування [13].

Особливості росту деревостанів після

пірогенного впливу вивчалися у роботі [14, 15]. Суттєва увага, при цьому, приділяється ксилемній частині, оскільки деревина являє собою господарську цінну частину дерева. Пошкодження кори розглядається менше, хоча саме ця тканина отримує первинний термічний шок.

Ряд наукових робіт [16, 17] присвячений вивченню впливу теплових потоків пожежі на життєдіяльність деревостанів. Вони містять мало даних про температури нагріву, які можуть витримати тканини стовбура, хвоя, пагони, а також коріння. Але ці дані мають першорядне значення для прогнозування ступеню пошкодження вегетативних органів деревостанів при лісових пожежах, що свідчить про актуальність досліджень, які спрямовані на виявлення стійкості хвойного деревостану до впливу лісових пожеж.

Мета. Розробка моделі впливу температури на стовбур дерева у залежності від тривалості впливу, відстані від кромки пожежі, від висоти пожежі.

Об'єкти і методи досліджень

У Харківському регіоні одним з об'єктів лісового господарства є «ДП Жовтневий лісгосп» Харківського обласного управління лісового і мисливського господарства, що знаходиться поблизу міста Харкова. За останні роки площа пожеж на території даного лісгоспу постійно зростає і сягає до 30 га щорічно. Тому об'єктом дослідження визначено частину борової тераси р. Уди в межах території «ДП Жовтневий лісгосп».

Досліджувана ділянка зазнала впливу пірогенного чинника: стовбури сосен віком близько 20 років обгоріли до висоти 2-3 м. Ділянка являє собою територію слабо нахиленої фації з сірими лісовими опідзоленими ґрунтами під сосновим бором з сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) та з переважаючим домінуванням злакової рослинності (*Gramineae*).

Будь-яке фізичне явище, у тому числі і процес теплопередачі, відбувається у просторі і часі. Тому аналітичне дослідження теплопровідності зводиться до вивчення просторово-часової зміни основної фізичної величини – температури, характерної для

даного явища, тобто до знаходження залежності:

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

де x, y, z – просторові координати у декартовій системі, t – час.

Під нестационарним температурним полем розуміють таке поле, температура якого змінюється не лише у просторі, але і з плином часу, або, як образно кажуть, «температура є функція простору і часу». Рівняння (1) є математичним записом нестационарного температурного поля.

Для спрощення будемо розглядати рух конвективних потоків у напрямку руху вітру, тобто досліджуємо найбільш небезпечну ситуацію руху фронту пожежі. Таким чином розглядається одновимірне поле:

$$T = f(x, t), \quad \frac{dT}{dy} = \frac{dT}{dz} = 0 \quad (2)$$

Диференціальне рівняння теплопровідності для одновимірного потоку матиме вигляд:

$$c \cdot \gamma \frac{dT}{dt} = \lambda \frac{d^2T}{dx^2} \quad \text{або} \quad \frac{dT}{dt} = a \frac{d^2T}{dx^2} \quad (3)$$

де T , γ , c , λ – температура, щільність, теплоємність і теплопровідність, відповідно; t – часова координата.

Тепловий потік від фронту лісової пожежі:

$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

Температура у будь-якій точці від джерела вогню буде залежити від координат x і y . При рівномірному нагріванні стовбура дерева у будь-якій точці, що знаходиться на відстані r від полум'я, температура у даний момент часу буде однакою. Отже, ізотермічні поверхні будуть являти собою циліндричні поверхні, коаксіально розташовані до поверхні циліндра. Між радіальною координатою r (радіус-вектор) і координатами x і y існує зв'язок:

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (5)$$

Тоді диференціальне рівняння теплопровідності є:

$$\frac{dT}{dt} = a \left(\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} \right) \quad (6)$$

можна перетворити так:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{dT}{dr} \frac{dr}{dx} = \frac{dT}{dr} \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{dT}{dr} \frac{x}{r} \quad (7)$$

$$\frac{dT}{dy} = \frac{dT}{dr} \frac{dr}{dy} = \frac{dT}{dr} \frac{y}{r} \quad (8)$$

Диференціюючи (7) за x а (8) за y отримуємо:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = \frac{d^2T}{dr^2} \cdot \frac{x^2}{r^2} + \frac{dT}{dr} \cdot \frac{y^2}{r^3} \quad (9)$$

$$\frac{d^2T}{dy^2} = \frac{d^2T}{dr^2} \cdot \frac{y^2}{r^2} + \frac{dT}{dr} \cdot \frac{x^2}{r^3} \quad (10)$$

Складаючи рівняння (9) і (10) отримаємо для рівняння теплопровідності наступний вираз:

$$\frac{dT}{dt} = a \left(\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} \right) \quad (11)$$

Представлена задача вирішена методом кінцевих різниць. Для вирішення кінцево-різницевого аналогів одновимірних рівнянь використаний метод прогонки.

Залежність щільності променистого теплового потоку від фронту лісової пожежі описується за формулою:

$$q = 326.37e^{-0.2791x} \quad (12)$$

де: x – відстань до кромки пожежі, м; q – щільність теплового випромінювання, кВт/м².

Використавши дану залежність, спрогнозуємо теплове випромінювання від вогню, що діє на стовбури дерев на різній відстані від кромки пожежі (рис. 1).

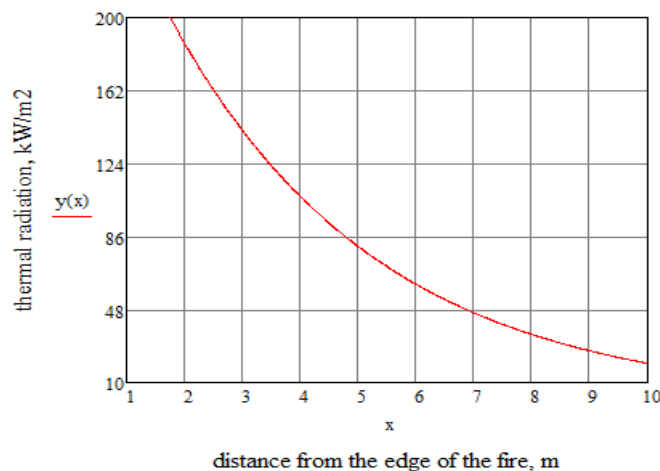


Рис. 1 – Розрахунок залежності щільності променистого теплового потоку від фронту лісової пожежі

Результати та обговорення

Математична модель впливу пірогенного чинника на хвойні деревостани

Розрахунок можливої температури на поверхні стовбура дерева виконано за формулою (12) [18] та результати згруповано у таблиці 1:

$$T_1 = T_0 + \frac{q \cdot t}{A} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{\pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \gamma \cdot t}{4}}} \quad (13)$$

де: T_1 – температура на поверхні стовбура, °С;

T_0 – початкова температура, °С;

q – щільність теплового випромінювання, кВт/м²;

t – час дії термічного чинника, с;

A – коефіцієнт поглинання;

γ – щільність, кг/м³;

λ – теплопровідність Вт/(м·К);

c – питома теплоємність, кДж/(кг·К).

Таблиця 1

Результати розрахунку теплового випромінювання і температури нагріву стовбура дерева при пірогенному впливі в залежності від тривалості його дії

Параметри	Відстань від кромки пожежі до стовбура дерева, м							
	3	4	5	6	7	8	9	10
Теплове випромінювання, кВт/м ²	141	106	80	61	46	34	26	20
Температура при t – часу впливу пірогенного чинника, с:								
$t=10$	275	212	166	131	104	85	70	59
$t=30$	457	349	267	207	161	127	102	83
$t=60$	635	482	367	281	217	169	133	106

Істотний вплив теплового випромінювання на деревостани в основному відбувається при пожежах, коли полум'я прямовисне і досягає висоти 2–3 метри. У цьому випадку максимальний тепловий потік спрямований по горизонталі до деревостану і вражає крони хвойного підросту, спляюючи хвою, або перегріваючи хвою і пагони, що також призводить до загибелі молодих дерев. У той же час, деревостани старшого віку отримують лише опіки, що не призводить до їх загибелі, але знижується їх життєздатність та сортність деревини. З розрахунків видно, що впродовж впливу пірогенного чинника 60 с на відстані всього 3 метрів при конвективних потоках спрямованих у бік деревостану температура може досягати понад 550°С (рис. 2). Таким чином, можна спрогнозувати можливу температуру, що впливає на дерева у залежності від відстані до джерела вогню та часу впливу. Очевидно, що при такій температурі при підвищеній вологості якщо і не відбудеться загоряння, то пагони, звичайно ж, втратять свою життєздатність.

У залежності від виду пожежі та її інтенсивності конвекційний тепловий потік

відрізняється як за температурою, так і за тривалістю впливу на крону. Залежно від цих параметрів відбувається або опік усієї крони (пагонів, листя, хвої), що призводить до загибелі дерева, або крона буде пошкоджена частково і залишиться життєздатною.

Більш наглядно дану модель впливу пірогенного чинника на дерева відображає тривимірна модель (рис. 3). Але слід зазначити, що для визначення щільності теплового потоку була використана залежність (12). Яка справедлива при висоті пожежі 2–2,5 м. При більш низьких пожежах, звичайно ж, теплове випромінювання буде меншим.

Тепловий потік від полум'я 2–3 м створює на поверхні стовбурів температуру близько 500-600°С і в цьому випадку дерева діаметром від 16 см і більше отримують опік камбіальної зони. Дерев меншого діаметру, які отримують кругового опіку по діаметру стовбура при такій температурі гинуть. Отримані нами розрахункові дані добре узгоджуються з експериментальними даними Валендіка Е. Н. і Косова І. В. [19].

Спрогнозуємо вплив температурного фактору на стовбури дерев при іншій висоті пожежі. Щільність теплового потоку під-

дається наступній у залежності від висоти пожежі [19]:

$$q = 16,638x + 29,772 \quad (14)$$

де x – висота пожежі, м; q – щільність теплового випромінювання, кВт/м².

Наприклад, при висоті пожежі 1,5 м на стовбурі дерев температура може дося-

гати 300⁰С вже через 60 с впливу пірогенного чинника (табл. 2., рис. 4). Оскільки у залежності (14) також є обмеження: вона враховує різну висоту полум'я, але більш справедлива для відстані від кромки пожежі біля 4 метрів, то у залежності від умов слід вибирати ту або іншу прогностну модель.

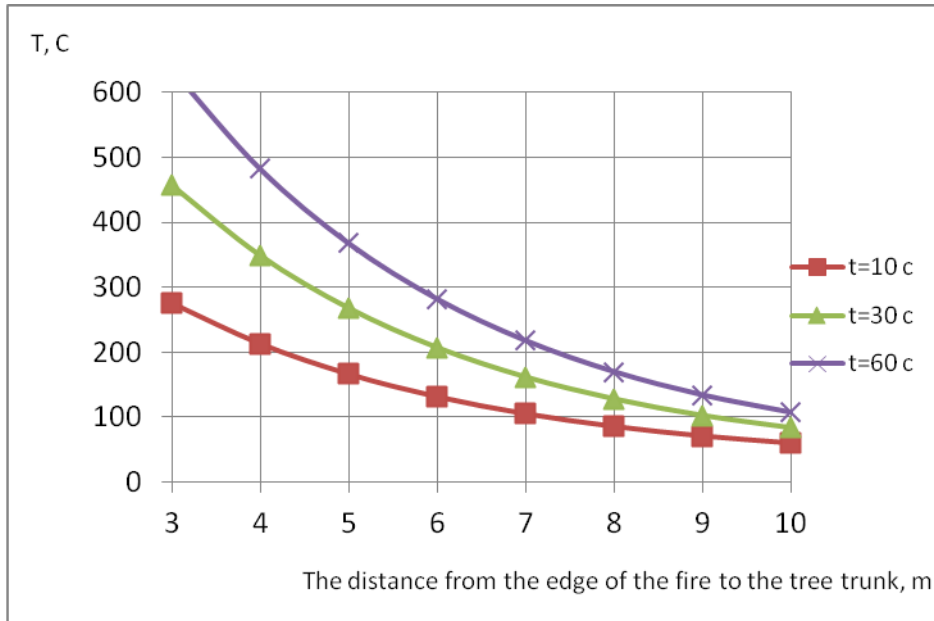


Рис. 2 – Розрахунок нагріву поверхні стовбура дерева від теплового випромінювання у залежності від відстані до кромки пожежі при різному часі впливу

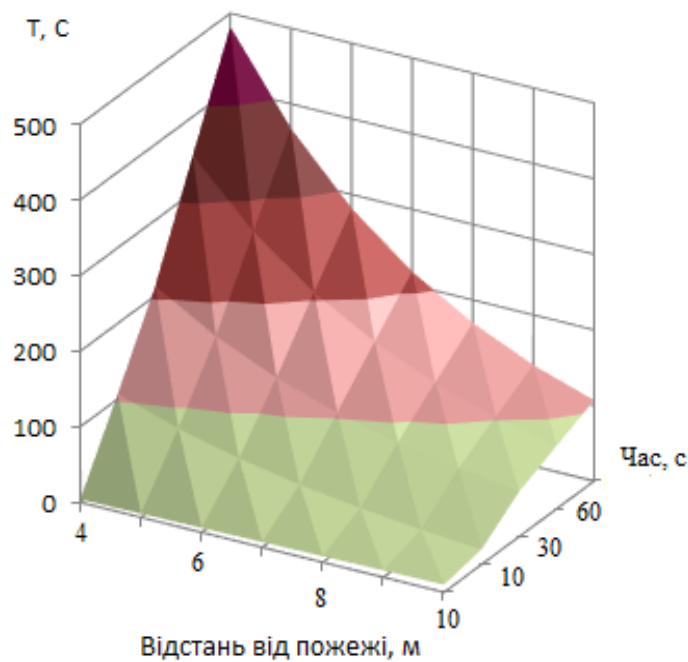


Рис. 3 – Тривимірна модель нагріву стовбура дерева під пірогенним впливом у залежності від часу дії і відстані до кромки пожежі при висоті пожежі близько 2 м

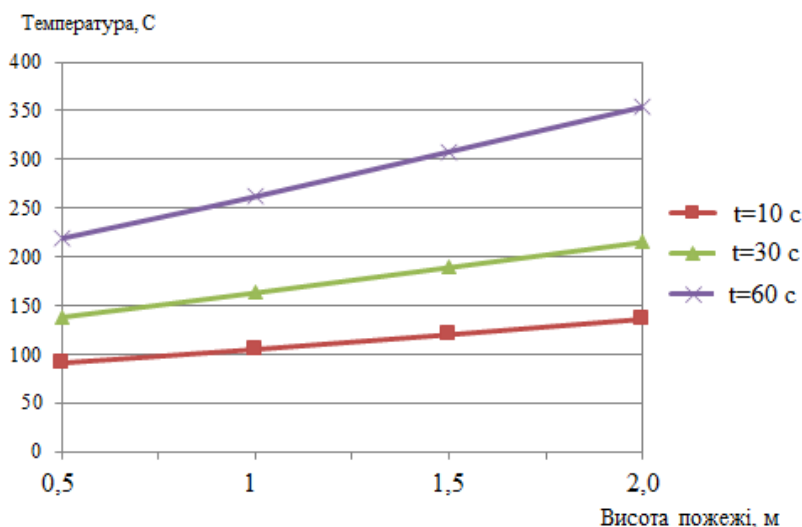


Рис. 4 – Розрахунок нагріву поверхні стовбура дерева від теплового випромінювання у залежності від висоти полум'я при відстані від кромки пожежі близько 4 м

У таблиці 2 наведені розрахунки теплового потоку і температури на поверхні стовбура дерева у залежності від висоти полум'я і часу термічної дії. Більш показовим є тривимірна модель (рис. 5).

Встановлено, що навіть при низових пожежах з висотою полум'я 0,5–1 м щільність теплового потоку ближче 2 м від полум'я перевищує 12 кВт/м^2 . Рівень випромінювання в 12 кВт/м^2 заподіює опік миттєво [20].

З таблиці 2 випливає, що вже при висоті полум'я 0,5 м у деревостанів на відстані 4 м від пожежі, температура на поверхні кори дерева може досягати 138°C при тривалості впливу 30 с. При такій температурі пагони гинуть у кроні хвойних дерев. Тепловий потік від полум'я заввишки 2 м створює на поверхні стовбурів температуру понад 450°C і в цьому випадку дерева діамет-

ром від 16 см і більше отримують опік камбіальної зони. Дерев меншого діаметру, які отримують кругового опіку по діаметру стовбура при такій температурі гинуть [21].

Як показує практичний досвід, у десятках метрів по периметру території, що зазнала впливу пожежі, протягом 2–3 років, відмирає більшість дерев пошкоджених вогнем, які зберегли у перший рік зелену крону. Це призводить не лише до додаткових витрат (обстеження, рубки), а й до суттєвих втрат від не отриманої вигоди за рахунок зниження товарності деревини [22].

При пожежі у деревині деревостанів високий вміст вологи (у сосні близько 80%) і при високій температурі відбувається пропарювання, що викликає гідролітичну деградацію деревного комплексу. При цьому частково руйнуються зв'язки в самому лігніні з геміцелюлозами, що призводить до

Таблиця 2

Результати розрахунку теплового випромінювання і температури нагрівання стовбура дерева при пірогенному впливі на відстані 4 м в залежності від висоти полум'я та часу дії пожежі

Висота пожежі, м	Теплове випромінювання, кВт/м^2	Час впливу пірогенного чинника на стовбур дерева					
		10	30	60	90	120	180
0,5	38	91	138	184	219	249	298
1	46	105	163	220	262	299	360
1,5	54	120	189	257	308	352	425
2	63	136	215	293	354	404	489

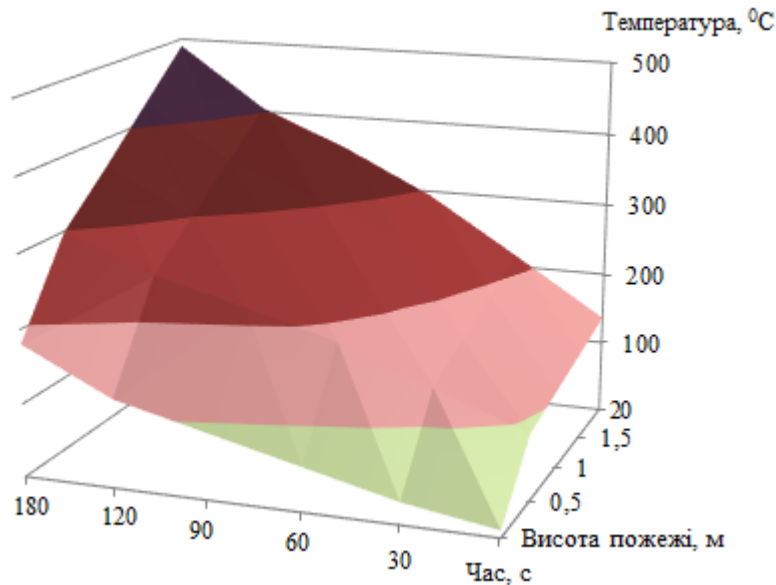


Рис. 5 – Тривимірний графік нагрівання стовбура дерева під впливом пірогенного чинника у залежності від часу дії і висоти пожежі на відстані 4 м

збільшення деформованості клітинних стінок. При пропарюванні відбувається часткове руйнування водневих зв'язків і хімічні зміни деревинної речовини, обумовлені термогідролітичною деструкцією. При цьому частина геміцелюлоз і пектинових речовин переходять у розчин. У результаті цього речовини, що є складовими деревини, розм'якшуються, і деревина стає більш деформованою [23].

Вплив вогню послаблює захисні функції кори дерева, що є «чудою» передую-

мовою для інтенсивного ураження дерева руйнівними грибами і личинками комах. Наявність грибниці на пострірогенній території на значній площі лісової підстилки на кореневій і прикореневій частині стовбура сосни, а у дерев листяних порід по всій висоті стовбура буде різко знижувати якість деревини. Причиною можливого зниження є сприятливі умови для інтенсивного розвитку різних грибів і ураження деревостанів комахами [22].

Висновки

Отримані результати дають можливість прогнозувати післяпожежний стан деревостанів. Подальші дослідження теплового випромінювання при пожежах різного виду є актуальними, оскільки дають можливість передбачити вплив на інші компоненти екосистеми. Бруньки та пагони можуть гинути вже при температурі теплового потоку 60°C за 120-180 секунд. За розрахунками така температура може бути досягнута на відстані лише 4 метри від кромки

полум'я при низовій пожежі.

Для оцінки і прогнозування післяпожежної загибелі дерев при пошкодженні крон необхідно знати не лише теплові параметри пожежі, а й ступінь витривалості вегетативних органів крони до термічного впливу. Пошкодження стовбурів деревостанів і їх загибель при пожежах залежить також від товщини кори і часу впливу високих температур, а також від діаметра стовбура.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Література

1. Asotskiy V., Buts Y., Kraynyuk O., Ponomarenko R. Post-pyrogenic changes in the properties of grey forest podzolic soils of ecogeosystems of pine forests under conditions of anthropogenic loading. *Journ. Geol. Geograph. Geoecology*. 2018. Vol. 27. No P. 175-183. URL: <https://doi.org/10.15421/111843>
2. Laurance W. F., Delamonica P., Laurance S. G., Vasconcelos H., Lovejoy T. E. Rainforest fragmentation kills big trees *Nature*. 2000. Vol. 404. No 6780. P. 836. <https://doi.org/10.1038/35009032>
3. Mesquita R. C. G., Delamonica P., Laurance W. F. Effect of surrounding vegetation on edge-related tree mortality in Amazonian forest fragments. *Biological Conservation*. 1999. Vol. 91. No 2-3. P. 129-134. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(99\)00086-5](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(99)00086-5)
4. Yankovich E. P., Baranovskiy N. V., Yankovich K. S. ArcGIS for assessment and display of the probability of forest fire danger *9th International Forum on Strategic Technology, IFOST*, 2014, P. 222-225.
5. Барановский Н. В., Андреева К. Математическое моделирование теплового воздействия от фронта лесного пожара на ствол хвойного дерева. *Cloud of Science*, 2015. Т. 2. № 4. С. 591-598.
6. Buts Yu. V. Features of geochemical migration of chemical elements after technogenic loading of pyrogenic nature. *Journal of Engineering Sciences*. Sumy: Sumy State University, 2018. Vol. 5. No 2, P. H1-H4.
7. Buts Y., Asotskiy V., Krainiuk O., Ponomarenko R. Dynamics of migration capacity of some trace metals in soils in the Kharkiv region under the pyrogenic factor. *Journ. Geol. Geograph. Geoecology*. 2019. Vol. 28. No 3. P. 409-416. URL: <https://doi.org/10.15421/111938>
8. Buts, Y., Asotskiy, V., Kraynyuk, O., Ponomarenko, R. Influence of technogenic loading of pyrogenic origin on the geochemical migration of heavy metals. *Journ. Geol. Geograph. Geoecology*. 2018. Vol. 27. No 1. P. 43-50. URL: <https://doi.org/10.15421/111829>
9. Буц Ю.В., Крайнюк Е.В. Динамика геохимической миграционной способности химических элементов под влиянием техногенной нагрузки пирогенного происхождения *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. 2018. Вип. 80. С. 223-234.
10. Фуряев Е.А. Пирозкологические свойства сосны обыкновенной в средней Сибири. *Хвойные бореальной зоны*. 2008, Т. 25. № 1 – 2. С.103-108.
11. Michaletz S. T., Johnson E. A. A biophysical process model of tree mortality in surface fires *Canadian Journal of Forest Research*, 2008, 38(7): 2013-2029, URL: <https://doi.org/10.1139/X08-024>
12. Michaletz, S.T., Johnson, E.A. & Tyree, M.T. Moving beyond the cambium necrosis hypothesis of post-fire tree mortality: cavitation and deformation of xylem in forest fires. *New Phytologist*, 2012, 194, 254–263. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.04021.x>
13. Dickinson M.B., Johnson E.A. Temperature-dependent rate models of vascular cambium cell mortality. *Can. J. For. Res.*, 2004, 34: 546–559. URL: <https://doi.org/10.1139/x03-223>
14. Sutherland, E.K.; Smith, K.T. Resistance is not futile: the response of hardwoods to fire-caused wounding. *Proceedings of the workshop on fire, people, and the central hardwood landscape. Gen. Tech. Rep.*, 2000, NE-274.
15. Буц Ю. Систематизація процесів пирогенної релаксії екогеосистем в умовах техногенного навантаження. *Екологічна безпека*. 2018. № 1(25). С. 7-12. URL: <https://doi.org/10.30929/2073-5057.2018.1.7-12>
16. Brose, P.H.; Van Lear, D.H. Survival of hardwood regeneration during prescribed fires: the importance of root development and root collar location. *Upland oak ecology symposium: history, current conditions, and sustainability. Gen. Tech. Rep. SRS-73*. Asheville, 2004. P.123-127.
17. Green S.R., Arthur M.A., Blankenship B.A. Oak and red maple seedling survival and growth following periodic prescribed fire on xeric ridgetops on the Cumberland Plateau. *Forest Ecology and Management*. 2010. Vol. 259. N 12. P. 2256-2266. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/forest-ecology-and-management/vol/259/issue/12>
18. Лыков А. В. Теория теплопроводности. 1980. 600с.
19. Валендик Э.Н., Косов И.В. Влияние теплового излучения лесного пожара на окружающую среду *Сибирский экологический журнал*. 2008. Вип. 4. С. 517-523.
20. Cohen, J.D. Relating Flame radiation to home ignition using modeling and experimental crown fires *Canadian Journal of Forest Research*. 2004. Vol. 34. N 8. P. 1616-1626. URL: <https://doi.org/10.1139/x04-049>
21. Van Wagner C. E. Fire behaviour mechanisms in a Red Pine Plantation: field and laboratory evidence, Forestry branch departmental publication *Queen's printer and controller of stationary*. 1968. 1229. 30.
22. Буц Ю.В. Науково-методологічні основи релаксії екогеосистем при техногенному навантаженні пирогенного походження. Дисс... докт. техн. наук 21.06.01 – екологічна безпека. Суми: Сумський державний університет. 399 с. URL: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/76266>
23. Kuznetsov G. V., Baranovsky N. V. Mathematical simulation of heat transfer at coniferous tree ignition by cloud-to-ground lightning discharge (01028) . *EPJ Web of Conferences*. 2014. Vol. 76. P. 1-6. URL: <https://doi.org/10.1051/epjconf/20147601028>

References

1. Asotskiy, V., Buts, Y., Kraynyuk, O. & Ponomarenko, R. (2018). Post-pyrogenic changes in the properties of grey forest podzolic soils of ecogeosystems of pine forests under conditions of anthropogenic loading. *Journ. Geol. Geograph. Geoecology*, 27(2), 175-183. <https://doi.org/10.15421/111843>
2. Laurance, W. F., Delamonica, P., Laurance S. G., Vasconcelos, H. & Lovejoy, T. E. (2000). Rainforest fragmentation kills big trees. *Nature*, 404(6780), 836. <https://doi.org/10.1038/35009032>
3. Mesquita, R. C. G., Delamonica, P. & Laurance, W. F. (1999). Effect of surrounding vegetation on edge-related tree mortality in Amazonian forest fragments. *Biological Conservation*, 91 (2-3), 129-134. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(99\)00086-5](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(99)00086-5)
4. Yankovich, E. P., Baranovskiy, N. V. & Yankovich, K. S. (2014). ArcGIS for assessment and display of the probability of forest fire danger. *Proceedings of the 9th International Forum on Strategic Technology, IFOST*, 6991108, 222-225.
5. Baranovsky, N. V. & Andreeva, K. (2015). Mathematical modeling of heat exposure from the front of a forest fire to a coniferous tree trunk. *Cloud of Science*, 2(4), 591-598 (in Russian).
6. Buts, Yu. V. (2018). Features of geochemical migration of chemical elements after technogenic loading of pyrogenic nature. *Journal of Engineering Sciences*, 5(2), H1-H4.
7. Buts, Y., Asotskiy, V., Krainiuk, O. & Ponomarenko, R. (2019). Dynamics of migration capacity of some trace metals in soils in the Kharkiv region under the pyrogenic factor. *Journ. Geol. Geograph. Geoecology*, 28(3), 409-416. <https://doi.org/10.15421/111938>
8. Buts, Y., Asotskiy, V., Kraynyuk, O. & Ponomarenko, R. (2018). Influence of technogenic loading of pyrogenic origin on the geochemical migration of heavy metals. *Journ. Geol. Geograph. Geoecology*, 27(1), 43-50. <https://doi.org/10.15421/111829>
9. Buts, Y. & Kraynyuk, O. (2018). Dynamics of geochemical migration ability of chemical elements under the influence of technogenic loading of pyrogenic origin. *Open Information and Computer Integrated Technologies: Scientific Bulletin of the National Aerospace University*, 80, 223-234 (in Russian).
10. Furyaev, V. V. & Furyaev, E. A. (2008). Piroecological properties of pine oriental in medium Siberia. *Coniferous boreal zone*, 25(1-2), 103-108 (in Russian).
11. Michaletz S. T. & Johnson, E. A. (2008). A biophysical process model of tree mortality in surface fires. *Canadian Journal of Forest Research*, 38(7), 2013-2029. <https://doi.org/10.1139/X08-024>
12. Michaletz, S. T., Johnson, E. A. & Tyree, M. T. (2012). Moving beyond the cambium necrosis hypothesis of post-fire tree mortality: cavitation and deformation of xylem in forest fires. *New Phytologist*, 194 (1), 254-263. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.04021.x>
13. Dickinson, M. B. & Johnson, E. A. (2004). Temperature-dependent rate models of vascular cambium cell mortality. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(3), 546-559. <https://doi.org/10.1139/x03-223>
14. Sutherland, E. K. & Smith, K. T. (2000). Resistance is not futile: the response of hardwoods to fire-caused wounding. *Proceedings of the workshop on fire, people, and the central hardwood landscape. Gen. Tech. Rep. NE-274*.
15. Buts, Y. (2018). Systematization of processes of pyrogenic relaxation of ecogeosystems in conditions of technogenic loading. *Ecological safety*, (1(25)), 7-12. <https://doi.org/10.30929/2073-5057.2018.1.7-12> (in Ukraine).
16. Brose, P. H. & Van Lear, D. H. (2004). Survival of hardwood regeneration during prescribed fires: the importance of root development and root collar location. *Upland oak ecology symposium: history, current conditions, and sustainability. Gen. Tech. Rep. SRS-73. Asheville*, 123-127.
17. Green, S. R., Arthur, M. A. & Blankenship, B. A. (2010). Oak and red maple seedling survival and growth following periodic prescribed fire on xeric ridgetops on the Cumberland Plateau. *Forest Ecology and Management*, 259 (12), 2256-2266. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/journal/forest-ecology-and-management/vol/259/issue/12>
18. Lyikov, A. V. (1980). *Heat conduction theory*, Moscow: Energiya. (in Russian).
19. Valendik, E. N. & Kosov, I. V. (2008). Impact of thermal radiation of a forest fire on the environment. *Siberian Journal of Ecology*, (4), 517-523 (in Russian).
20. Cohen, J. D. (2004). Relating Flame radiation to home ignition using modeling and experimental crown fires. *Canadian Journal of Forest Research*, 34 (8), 1616-1626. <https://doi.org/10.1139/x04-049>
21. Van Wagner, C. E. (1968). Fire behaviour mechanisms in a Red Pine Plantation: field and laboratory evidence, Forestry branch departmental publication. *Queen's printer and controller of stationary*, 1229, 30.
22. Buts, Yu. (2020). Scientific and methodological bases of relaxation of ecosystems under technogenic loading of pyrogenic origin. (Master's thesis). Sumy: Sumy State University. Retrieved from <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/76266> (in Ukraine).
23. Kuznetsov, G. V., & Baranovskiy, N. V. (2014). Mathematical simulation of heat transfer at coniferous tree ignition by cloud-to-ground lightning discharge. In *EPJ Web of Conferences* (Vol. 76). [01028] EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20147601028>

Надійшла до редколегії 09.03.2020

Прийнята 15.04.2020