

А. Д. Кузик, В. І. Товарянський, К. Л. Драч

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВИНИКНЕННЯ І ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖ У ТРАВ'ЯНИХ ЕКОСИСТЕМАХ

Постановка проблеми. Пожежі в природних екосистемах є явищем, яке спричиняє порушення умов збалансованості навколишнього природного середовища та життя людини. Поряд із лісовими пожежами, наслідками яких є значні матеріальні збитки та згубний вплив на атмосферу, виникають трав'яні пожежі, які спричиняють знищення фітоценозів та представників тваринного світу. Запобігання виникненню трав'яних пожеж – актуальне завдання, що потребує проведення досліджень в цьому напрямку.

Метою роботи є оцінка пожежонебезпечності ділянок, на яких домінує пирій повзучий (*Elytrigia repens*) як представник масово поширеного різновиду трав'яної рослинності на луках, пасовищах, ділянках сільськогосподарського призначення, які не експлуатуються, та ін., за сприятливих для поширення пожеж метеорологічних умов, вологості горючого матеріалу, а також геометричних параметрів рослин.

Опис матеріалу. Проведено дослідження пожежної небезпеки ділянок, вкритих трав'яною рослинністю, від середньої висоти рослин та швидкості вітру із застосуванням комп'ютерного моделювання трав'яної пожежі у середовищі фізичної моделі Wildland-Urban Fire Dynamics Simulator (WFDS). Оцінювали пожежну небезпеку ділянок пирію повзучого з середньою висотою рослин 20, 40, 60, 80 і 100 см за швидкістю поширення фронту пожежі з урахуванням швидкості вітру 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8 м/с. Відзначено випадки, за яких під впливом погодних умов горіння не відбувалось, а лише спостерігалось займання горючого матеріалу без подальшого поширення вогню, а також випадки виникнення й поширення горіння усією площею трав'яного покриву.

Результати. За результатами моделювання отримано значення швидкостей поширення фронту пожежі на трав'яних ділянках. Найбільшою є швидкість пожежі за висоти трав'яного покриву 40 см та швидкості вітру 3 м/с, а найменшою – за висоти трав'яного покриву 60 см та швидкості вітру 0 м/с. Встановлено залежність, яка описує динаміку пожежі за висотою трав'яного покриву як горючого матеріалу.

Наукова новизна. Встановлено, що за швидкістю поширення фронту пожежі найбільша пожежна небезпека ділянок пирію повзучого спостерігається за середньої висоти трави 40 см та швидкості вітру 3 м/с, що понад в 5 разів перевищує цей показник порівняно з висотою трави 60 см за відсутності вітру.

Ключові слова: трав'яна пожежа, природні екосистеми, комп'ютерне моделювання.

A. D. Kuzyk, V. I. Tovaryanskyi, K. L. Drach

Lviv State University of Life Safety

MODELING OF PROCESSES OF OCCURRENCE AND SPREAD OF FIRES IN GRASS ECOSYSTEMS

Formulation of the problem. Fires in natural ecosystems are emergency that leads to a violation of the balance of the environment and human life. Along with forest fires, the consequences of which are significant material damage and a detrimental effect on the atmosphere, grass fires occur, which entail the destruction of phytocenoses and representatives of the animal world. Prevention of grass fires is an urgent task that requires research in this direction.

The purpose of the work is to assess the fire hazard in areas dominated by creeping pyrium (*Elytrigia repens*) as a representative of the widespread species of grass vegetation in meadows, pastures, agricultural areas that are not exploited, etc., under meteorological conditions favorable for the spread of fires, and the humidity of combustible material, as well as the geometric parameters of plants.

Description of the material. A study of the fire hazard of areas covered by grassy vegetation from the average grass height and wind speed using computer simulation of a grass fire in the environment of the Wildland-Urban Fire Dynamics Simulator (WFDS) physical model was carried out. The fire hazard was estimated for creeping wheatgrass with an average plant height of 20, 40, 60, 80 and 100 cm from the propagation speed of the fire front, taking into account wind speeds of 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8 m/s. Cases are noted in which, under the influence of weather conditions, ignition did not occur, but only

ignition of combustible material was observed without further spread of fire, as well as cases of occurrence and spread of burning over the entire area of grass cover.

Results. Based on the simulation results, the values of the propagation rates of the fire front in grassy areas were obtained. The fire speed is greatest at a height of grass cover of 40 cm and a wind speed of 3 m/s, and the lowest at a height of grass cover of 60 cm and a wind speed of 0 m/s. A relationship is established that describes the dynamics of a fire along the height of the grass cover as a combustible material.

Scientific novelty. It has been established that in terms of the speed of propagation of the fire front, the greatest fire hazard of the grassland of creeping grass is observed at an average grass height of 40 cm and a wind speed of 3 m/s, which is more than 5 times this figure compared to a grass height of 60 cm in the absence of wind.

Key words: grass fire, natural ecosystems, computer simulation.

Вступ. Пожежі та пов'язані з ними надзвичайні ситуації техногенного або природного характеру сьогодні є актуальною проблемою сьогодення. Згідно з даними статистики, більшість пожеж відбувається саме з вини людини [1], де місце мають необережність поводження з вогнем, людська байдужість тощо. Особливої уваги заслуговують пожежі у природних екосистемах [2], [3]. Такі пожежі являють собою неконтрольований процес горіння, яке швидко поширюється у природному середовищі. При цьому відбувається горіння лісових насаджень, чагарників і трав'яної рослинності як окремо, так і в поєднанні між собою.

В Україні за останні десятиліття значного поширення набули лісові пожежі, зокрема в хвойних лісах, виникнення та розповсюдження яких становить небезпеку для населення, природного середовища та завдає збитків економіці країни. Поряд з цим має місце тенденція до збільшення кількості трав'яних пожеж, наслідком яких в основному є пошкодження рослинного покриву на значних площах. Наймасштабнішими різновидами трав'яних пожеж є степові, проте достатньо часто спостерігаються випадки горіння трав поблизу лісових насаджень або на територіях сільськогосподарських угідь.

Окремо слід відзначити випадки виникнення пожеж в природних екосистемах на території України у 2020 році. Зокрема це стосується таких регіонів нашої держави, як Київська та Житомирська області [4]. Значних збитків спричинили лісові та трав'яні пожежі, що виникали цього року у квітні-травні в межах території Чорнобильської зони відчуження. Хоча остаточних даних про те, скільки саме лісу згоріло внаслідок пожеж, поки що немає, проте відомо, що знищена вогнем площа лісів перевищила 3,5 тис. га, а державі завдано збитків на десятки мільйонів гривень [5] (рис. 1).



a)



b)

Рисунок 1 – Виникнення й поширення природної пожежі на території зони відчуження:

- a) – фото процесу горіння трави [5];
- b) – фото наслідків лісової пожежі [5]

Незважаючи на актуальність окресленої проблеми, зокрема проведених досліджень стосовно пожеж у природних екосистемах, умови розвитку трав'яних пожеж, чинники впливу на їх виникнення, а також процеси, які при цьому відбуваються, складають собою комплекс завдань, які потребують окремого поглибленого вивчення. Одним із напрямів є проведення досліджень щодо встановлення показників пожежної безпеки трав залежно від фізичних та метеорологічних умов, які отримують шляхом проведення експериментальних палів у природному середовищі [6]. Проте такі дослідження є небезпечними та потребують погодження зі службами відомств, якими здійснюється нагляд щодо захисту довкілля. Тому актуальним методом досліджень пожеж у природних екосистемах є комп'ютерне моделювання, використання якого дає змогу отримувати достовірні результати без загрози людям та довкіллю.

На теперішній час розроблено значну кількість різноманітних моделей поширення пожеж у природних екосистемах [7], [8]. Але найбільшої уваги заслуговують фізичні моделі, в основу яких покладено рівняння математичної фізики, які описують процеси тепломасообміну в умовах пожежі. Одна з таких моделей реалізована в програмному забезпеченні Wildland-Urban Fire Dynamics Simulator (WFDS) [9], яке застосовують для досліджень процесів виникнення та поширення пожеж

у природних екосистемах, зокрема й трав'яних пожеж. WFDS адекватно відображає процеси горіння трав [10].

Мета роботи – оцінити пожежну небезпеку ділянок з домінуванням пирію повзучого за сприятливих для поширення пожеж метеорологічних умов, вологості горючого матеріалу, залежно від швидкості вітру, а також геометричних параметрів рослин.

Прилади й методи. Для моделювання трав'яної пожежі використовували програмне забезпечення WFDS. Дослідження пожежної небезпеки проводили для ділянок, вкритих пирієм повзучим висотою від 20 до 100 см з інтервалом росту 20 см. Швидкість вітру вибирали 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8 м/с для кожного випадку моделювання з урахуванням висоти трав. Швидкість поширення пожежі визначали за результатами моделювання на дослідній ділянці з урахуванням досягнення температури займання горючого матеріалу.

Виклад основного матеріалу. Пирій повзучий (*Elytrigia repens*) – багаторічна рослина з гіллястим шнуроподібним кореневищем. Висота стебел становить 50–120 см. Зростає на рівнинах у вигляді травостою: на луках, пасовищах, ділянках сільськогосподарського призначення, які не експлуатуються, та ін., а також в горах. В Україні поширений практично на всій території. Інтенсивність росту спостерігається у вегетаційний період, зокрема в червні-серпні, знижується у вересні.

Дослідження проводили для ділянок з вмістом трав'яного покриву. Форма ділянки – прямокутна довжиною 10 м і шириною 4 м. Для проведення моделювання у середовищі WFDS задавали фізичні властивості горючого матеріалу на ділянці, зокрема, геометричні розміри, вологість, щільність, відношення площі поверхні до об'єму, початкову температуру та ін. (табл. 1).

Таблиця 1

Пожежонебезпечні властивості горючого (трав'яного) матеріалу на дослідній ділянці

Початкова температура, °С	Відношення площі поверхні до об'єму, м ⁻¹	Вологість, %	Щільність, кг/м ³	Насипна щільність, кг/м ³
20	4000	6	514	0,626

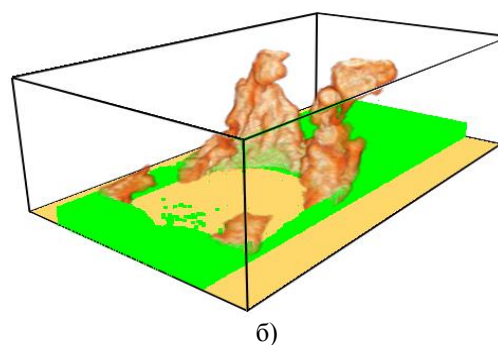
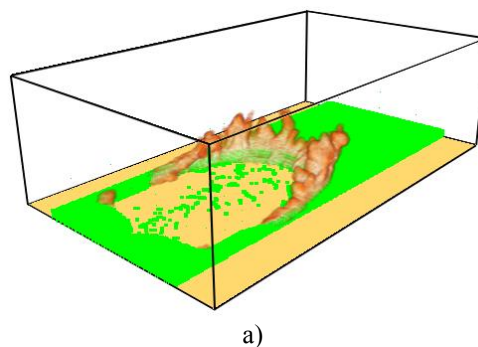
Окрім цього задавали хімічний склад горючого матеріалу (C_{3,4}H_{6,2}O_{2,5}), інтенсивність тепловиділення на одиницю площі (500 кВт/м²), а також питому теплоту згоряння, значення якої становить 17700 кДж/кг. Фізичні показники для процесу моделювання задавали відповідно до [9] та за результатами власних досліджень [11].

Підпал здійснювали на початку ділянки в одному місці. Для визначення температури полум'я

під час моделювання пожежі у середовищі WFDS застосовували термопари, розміщуючи їх за площею рослинного покриву на висотах 0; 0,25; 0,5; 0,75 та 1 м від поверхні ґрунту. Час виконання експерименту становив 300 с.

Важливе значення для процесу розвитку пожежі має вітер. В [6] встановлено, що за відсутності вітру в межах фронту пожежі виникають потоки, швидкість яких збільшується пропорційно збільшенню інтенсивності пожежі. Проте не завжди інтенсивність пожежі сприяє процесам масотеплоперенесення з тих чи інших причин. Тому важливо було дослідити, як змінюється швидкість пожежі залежно від приросту швидкості вітру із збільшенням висоти трав'яного покриву – а, отже, із збільшенням горючого навантаження.

Під час моделювання трав'яної пожежі визначали момент займання горючого матеріалу та момент поширення пожежі площею трав'яного покриву. Швидкість поширення визначали як відношення різниці відстаней між останньою та першою термопарами, розташованими в ряду, до часу, за якого відбувалось займання горючого матеріалу поруч з термопарами. Візуалізацію перебігу процесу моделювання пожежі спостерігали в програмі Smokeview (рис. 2).



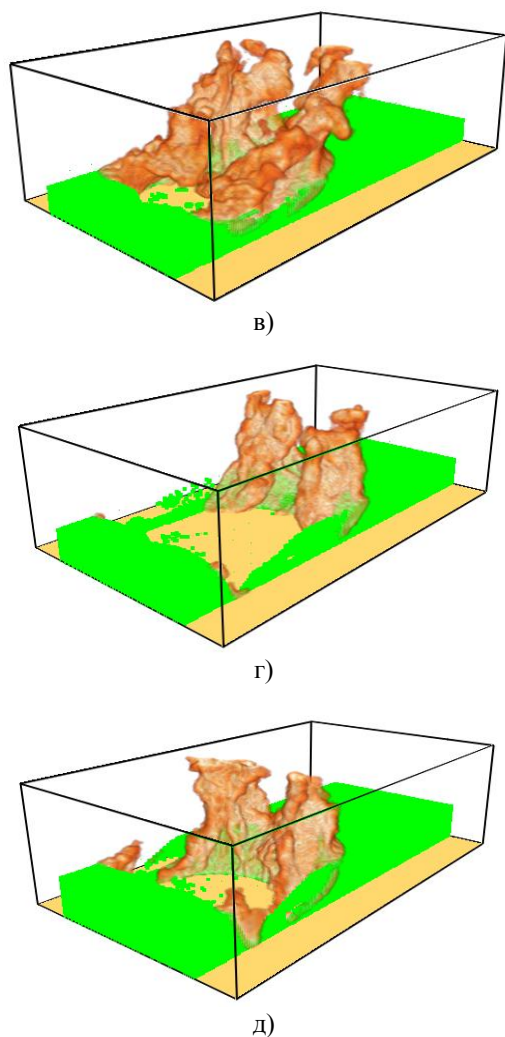


Рисунок 2 – Візуалізація процесу моделювання трав'яної пожежі на дослідній ділянці залежно від висоти трав'яного покриву: а) – 20 см; б) – 40 см; в) – 60 см; г) – 80 см; д) – 100 см

В процесі моделювання встановлено, що поширення пожежі відбувалося не завжди. За результатами моделювання отримано значення середньої швидкості поширення пожежі (табл. 2).

Таблиця 2

Середня швидкість поширення трав'яної пожежі на пробній ділянці залежно від висоти трав та швидкості вітру

Швидкість вітру, м/с	Швидкість поширення пожежі, м/хв для різних висот трав, см				
	20	40	60	80	100
0	-	-	5,23	6,96	14,96
1	-	16,91	19,31	20,11	19,5
2	19,79	20	24,38	25,32	21,77
3	23,21	27,46	21,15	26	22,94

Як видно з табл. 2, стрімкий розвиток трав'яної пожежі притаманний для швидкості вітру 2-3 м/с. За

швидкості вітру 0 м/с пожежа поширювалась для трав висотою 60 см і більше, а 4 м/с – не поширювалась, причому процес горіння припинявся. Зокрема за відсутності вітру горіння трави висотою 20 см припинялось на 5-6 с від моменту підпалу, а для трави висотою 40 см – на 9-10 с. Найбільшою є швидкість пожежі за висоти трав'яного покриву 40 см і швидкості вітру 3 м/с, а найменшою – за висоти трав'яного покриву 60 см та швидкості вітру 0 м/с. Варто відзначити, що за швидкості вітру 4 м/с і більше горіння трави відбувалось лише впродовж часу дії енергії джерела запалювання, який становив 5 с.

За отриманими результатами побудовано залежність усередненого значення швидкості поширення трав'яної пожежі від висоти трави (рис. 3).

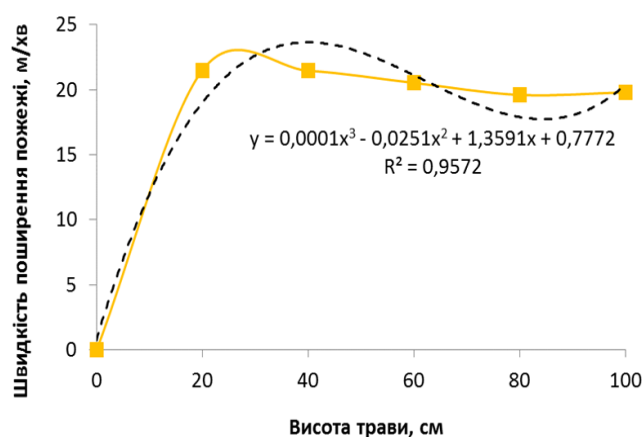


Рисунок 3 – Швидкість поширення трав'яної пожежі на дослідній ділянці

Швидкість трав'яної пожежі інтенсивно зростає за висоти трав 0-20 см, проте для висоти 40-100 см цей показник зменшується одночасно зі збільшенням вітру. Залежність швидкості трав'яної пожежі v , м/хв описується поліноміальною регресійною моделлю $v = 0,0001h^3 - 0,0251h^2 + 1,3591h + 0,7772$ з коефіцієнтом достовірності апроксимації $R^2 = 0,9572$, де h – висота трави, см.

Швидкість поширення пожежі із збільшенням висоти трав загалом зростає, оскільки збільшується пожежне навантаження, однак для трав висотою 1 м відбувається зниження швидкості поширення пожежі, спричинене ймовірно особливостями процесів тепломасообміну в середині шару горючого матеріалу великої товщини.

За швидкості вітру 0 м/с і висоти трав 20-40 см, а також за вітру швидкістю 1 м/с і висотою 20 см, горіння не поширювалося з причини недостатнього попереднього прогрівання полум'ям горючого матеріалу. Для більших висот трав та швидкостей вітру попереднє прогрівання відбувалося інтенсивніше внаслідок зменшення кута нахилу полум'я до

горизонтальної поверхні, що спричиняє більшу інтенсивність теплового випромінювання та зростання конвективного передавання тепла.

Відсутність поширення пожежі за швидкостей вітру 4-8 м/с зумовлена інтенсивним охолодженням горючого матеріалу потоками повітря.

Висновок. На основі моделювання процесів поширення трав'яної пожежі на ділянках, вкритих пириєм повзучим, встановлено, що найбільша пожежна небезпека за швидкістю поширення фронту пожежі спостерігається за висоти трав 40 см та швидкості вітру 3 м/с, що понад в 5 разів перевищує цей показник порівняно з висотою трави 60 см та за відсутності вітру.

Список літератури

1. National Fire Protection Association (NFPA) [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.nfpa.org/Public-Education/Fire-causes-and-risks/Wildfire>.
2. Гербут Ф. Ф. Лісова пірологія. УНУ ГФ. Ужгород, 2012. 103 с.
3. Тишков А. А. Пожары в степях и саваннах. Вопросы степеведения, 2009. № 7. С. 79–83.
4. У Чорнобильській зоні досі тліє трава, на Житомирщині вогонь знищив... [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.pravda.com.ua/news/2020/04/17/7248264/>
5. На ЧАЕС розповіли про наслідки пожеж у зоні відчуження [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://zaxid.net/naslidki_pozhezhi_u_chornobilskiy_zoni_2020_n1500905
6. Гришин А. М., Фильков А. И., Лобода Е. Л., Рейно В. В., Руди Ю. А., Кузнецов В. Т., Караваев В. В. Экспериментальные исследования возникновения и распространения степного пожара в природных условиях. Вестник ТГУ, 2011. № 2(14). С. 91–102.
7. Czerpak T., Maciak T. Modelowanie pożaru lasu. Część I. Metody i algorytmy modelowania pożaru lasu. Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza, 2011. Nr 3. Str. 83-94.
8. Тарасенко О. А. Розвиток наукових основ ліквідації наземних ландшафтних пожеж : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра. техн. наук. Харків, 2011. 36 с.
9. Mell W., McNamara D., Maranghides A., McDermott R., Forney G., Hoffman C., Ginder M. Computer modelling of wildland-urban interface fires. Fire & Materials, San Francisco, CA, 2011. 12 p.
10. Mell W., Charney J. J., Cheney P., Gould J. Numerical Simulations of Grassland Fire Behavior from the LANL - FIRETEC and NIST - WFDS Models. Sensing and Modeling Applications to Wildland Fires Tsinghua University Press. Heidelberg, 2013.
11. Кузык А. Д., Драч К. Л. Пожежна небезпека найпоширеніших трав'янистих рослин лук Західної України. Пожежна безпека: Збірник наукових праць. ЛДУ БЖД. Львів, 2016. № 29. С. 87–92.

References

1. National Fire Protection Association (NFPA). Retrieved from: <https://www.nfpa.org/Public-Education/Fire-causes-and-risks/Wildfire>.
2. Gerbut F. F. Forest pyrology. UNU GF. Uzhgorod, 2012. 103 p.
3. Tishkov A. A. Fires in the steppes and savannas. Issues of history studies, 2009. Nr. 7. Pp. 79–83.
4. In the Chornobyl zone the grass is still smoldering, in the Zhytomyr region the fire has destroyed... Retrieved from: <https://www.pravda.com.ua/news/2020/04/17/7248264/>
5. At Chernobyl described the effects of fires in the exclusion zone. Retrieved from: https://zaxid.net/naslidki_pozhezhi_u_chornobilskiy_zoni_2020_n1500905
6. Grishin A. M., Fil'kov A. I., Loboda E. L., Rejno V. V., Rudi Yu. A., Kuznecov V. T., Karavaev V. V. Experimental studies of the occurrence and spread of a steppe fire in natural conditions. Bulletin of TSU, 2011. Nr. 2(14). Pp. 91–102.
7. Czerpak T., Maciak T. Modeling a forest fire. Part I. Methods and algorithms for forest fire modeling. Safety & Fire Technology, 2011. Nr. 3. Pp. 83-94.
8. Tarasenko O. A. Development of the scientific basis for the elimination of terrestrial landscape fires. Kharkiv, 2011. 36 p.
9. Mell W., McNamara D., Maranghides A., McDermott R., Forney G., Hoffman C., Ginder M. Computer modelling of wildland-urban interface fires. Fire & Materials, San Francisco, CA, 2011. 12 p.
10. Mell W., Charney J. J., Cheney P., Gould J. Numerical Simulations of Grassland Fire Behavior from the LANL - FIRETEC and NIST - WFDS Models. Sensing and Modeling Applications to Wildland Fires Tsinghua University Press. Heidelberg, 2013.
11. Kuzyk A. D., Drach K. L. Fire danger of the most common herbaceous plants onions in Western Ukraine. Fire safety, 2016. Nr. 29. Pp. 87–92.