



*А. Д. Кузик, В. І. Товарянський*

*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0118-9493> – А. Д. Кузик

<https://orcid.org/0000-0002-4484-8164> – В. І. Товарянський



[andrij\\_k@yahoo.com](mailto:andrij_k@yahoo.com)

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЖЕЖ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР З ВИКОРИСТАННЯМ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

**Постановка проблеми.** В Україні та світі спостерігається тенденція росту надзвичайних ситуацій. Окрім пожеж на виробництві, у побуті чи на транспорті постійно виникають природні пожежі, зокрема пожежі в екосистемах. Окремою категорією природних пожеж є пожежі в агроценозах, зокрема на посівних площах зернових культур. Значна пожежна небезпека властива для посівів пшениці, жита тощо, а пожежі поширюються на великі площі, і спричиняють значні матеріальні збитки. Пожежна безпека зернових культур досягається не лише застосуванням правил та норм, але й наступними дослідженнями таких пожеж, зокрема їх моделюванням.

**Мета роботи** – обґрунтувати можливість використання комп'ютерної програми *Wildland-Urban Fire Dynamic Simulator (WFDS)* для дослідження процесів поширення пожеж на площах, вкритих зерновими культурами.

**Опис матеріалу.** У роботі описано дослідження процесів виникнення та поширення пожеж на ділянках пшениці звичайної та жита посівного. Дослідження проводили у польових умовах, а також моделюванням у *WFDS*. Дослідження охоплювали визначення вологості горючого матеріалу рослинного походження, фізичних властивостей рослинного шару зернових культур, мікрокліматичних умов, використання отриманих даних для формування вхідного файлу *WFDS* для моделювання пожежі та візуалізації отриманих результатів.

**Результати.** Встановлено, що швидкості поширення фронту пожеж на полях пшениці та жита залежать від швидкості вітру, напрям якого збігається з напрямом поширення пожеж, та дещо різняться між собою. За відсутності вітру швидкість поширення фронту пожежі для всіх рослин зростає із зростанням висоти шару рослин від 0,2 до 1 м. Для швидкостей вітру від 1 до 3 м/с швидкості поширення пожеж для всіх рослин також зростають із збільшенням висоти шару від 0,2 до 0,8 м, а на висоті 1 м дещо знижуються. Для жита швидкості поширення фронту пожежі є більшими за відповідні швидкості поширення пожеж посівів пшениці для швидкостей вітру 0 і 1 м/с. За швидкості вітру 2 м/с цей показник є більшим для посівів пшениці, а коли швидкість вітру становить 3 м/с, то практично нема різниці між швидкостями поширення фронту пожежі для обох культур. Порівнявши отримані результати із результатами раніше змодельованої пожежі трав'яної пожежі, бачимо подібні закономірності. Для рослинних шарів висотою 40 см найбільша швидкість поширення фронту пожежі властива для жита посівного (28,67 м/хв), що перевищує відповідні значення для пшениці та трави в 1,04 та 1,14 разів відповідно.

**Ключові слова:** *Wildland-Urban Fire Dynamic Simulator (WFDS)*, пожежа, природні екосистеми, зернові культури, моделювання, швидкість поширення фронту пожежі.

*А. Д. Кузик, В. І. Товарианський*

*Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine*

## RESEARCH OF FIRES IN GRAIN CROPS USING COMPUTER SIMULATION

**Formulation of the problem.** In Ukraine and the world, there is a trend of increasing emergencies. In addition to fires in everyday life or transport, natural fires constantly occur particularly fires in ecosystems. A separate category of natural fires is crop fires. A significant fire hazard is characteristic of crops of wheat, rye, etc. and is characterised by damage to territories over large areas, and as a result, the loss of grain. The fire safety of crops is not only in the application of rules and knowledge but also in the study of such fires.

**The purpose of the work** is in substantiating the feasibility of using the *Wildland-Urban Fire Dynamic Simulator (WFDS)* model to study crop fires.

**Description of the material.** In the work, a study was made of the processes of occurrence and spread of fires of common wheat and sowing rye. The studies were carried out in the field, as well as using the *WFDS* model. The research included determining the moisture content of the material, establishing microclimatic conditions within the limits of crop growth, calculating the data and filling it with the original model file for modelling and visualising the results.

**Results.** It has been established that the fire rates of wheat, rye and grass increase intensively at a height of 0-20 cm. The burning rate of rye increases and reaches a maximum height of 40 cm, after which there is a tendency to decrease. The fire rate of 40 cm high wheat was the lowest in the series of investigated plant combustible materials. However, this value increased along with the height of wheat 80 cm by 1,03 times. A comparison of the obtained results with the results of the previously modelled grass fire showed that its speed was the lowest, but at a height of 40 cm, the grass fire speed increased by 1,21 m/min compared to wheat. Among all the studied plants with a height of 40 cm, the highest fire spread rate is characteristic of sowing rye (28,67 m/min), which exceeds these values for grass and wheat by 1,04 and 1,14 times, respectively.

**Keywords:** Wildland-Urban Fire Dynamic Simulator (WFDS), fire, natural ecosystems, grain crops, modelling, fire spread rate.

**Постановка проблеми.** Проблема виникнення надзвичайних ситуацій в Україні та світі не втрачає своєї актуальності. Окрім загроз, спричинених техногенними аваріями і катастрофами, значну кількість становлять природні небезпечні явища, а саме природні пожежі в екосистемах [1]. До таких пожеж зокрема належать: лісові, степові та торф'яні. Окремою категорією природних пожеж є пожежі зернових культур в агроценозах (особливо у поствегетаційний період, під час жнив), які також характеризуються періодичністю, процесами виникнення й поширення горіння. Причини виникнення пожеж зернових культур залишаються типовими: необережне поводження з вогнем, порушення правил експлуатації зернозбиральних машин та агрегатів, випалювання стерні тощо. Практика свідчить, що значна пожежна небезпека властива для посівів пшениці, жита, ячменю та вівса за досягнення низьких значень

вологості надземної частини рослин (до 14%). Найбільших пошкоджень пожежами зернових в Україні зазнають південні та центральні регіони. Зокрема, в умовах надмірної спеки та надзвичайного рівня (5 класу) пожежної небезпеки, на початку липня 2019 року в Полтавській обл. вогнем знищено понад 25 га пшениці [2]. А посередині літа 2021 року в Одеській обл. через необережне поводження з вогнем знищено понад 2 га пшеничного поля, а також пошкоджено поруч розташовані ділянки угідь [3]. Надзвичайно складним виявився і цьогорічний період дозрівання та збору врожаю зернових культур, протягом якого в умовах воєнних дій на території України окупаційні війська країни-агресора в межах південних та східних територій внаслідок обстрілів спричиняли підпали зернових культур (рис. 1) [4].



**Рисунок 1** – Наслідки від пожежі пшеничного поля (Україна, Донецька обл., 2022) [4]

Виникнення таких пожеж зумовлює необхідність використання значної кількості пожежної техніки, обладнання та засобів гасіння, а також людських ресурсів, що в умовах війни здебільшого є неможливим через загрози життю рятувальників.

Протипожежний захист об'єктів агропромислового комплексу, в тому числі

сільськогосподарських угідь – важливе завдання, що передбачає проведення організаційних, технічних та інших заходів із запобігання пожежам, убезпечення людей, збереження довкілля тощо [5]. Не менш важливим є проведення досліджень у галузі пожежної безпеки зернових культур, які дають змогу вивчати природу пожежі, пожежонебезпечні властивості, а

також поведінку пожежі шару рослинного горючого матеріалу залежно від умов навколишнього середовища.

#### **Аналіз останніх досліджень та публікацій.**

На теперішній час відома низка досліджень, що ґрунтуються на вивченні процесів виникнення та поширення пожеж у природних екосистемах, в тому числі зернових культур, та застосовують різноманітні математичні й комп'ютерні моделі. Зокрема в роботі [6] досліджували швидкість поширення природної пожежі з використанням логістичного регресійного аналізу. Авторами праці [7] стисло описано емпіричні моделі, що набули розвитку в сфері досліджень пожеж у природних екосистемах, з яких уваги заслуговують такі, як: *Anderson, Burrows, Catchpole, Cheney* та ін. Застосовують також і фізичні (детерміновані) моделі, зокрема модель, на основі якої розроблено програмне забезпечення *Wildland-Urban Fire Dynamic Simulator (WFDS)*, і яка дає змогу досліджувати фізичні процеси виникнення та поведінки пожеж у природних екосистемах, зокрема лісових і трав'яних [8, 9]. Адекватність цієї моделі була підтверджена для трав'яних пожеж у [10]. У роботі [11] доведено адекватність цієї моделі за результатами досліджень пожеж соснових молодяків, а в [12] її використано та підтверджено адекватність для трав'яних пожеж в Україні. Таким чином, за наявності даних про фізико-хімічні властивості горючого матеріалу, а також умови навколишнього середовища, актуальним завданням є оцінити ефективність *WFDS* моделі як інструментарію для досліджень пожеж зернових культур.

**Мета роботи** – обґрунтувати доцільність використання моделі *WFDS* для дослідження пожеж зернових культур в період досягання як пожеж в агроекосистемах та порівняти отримані результати з аналогічними результатами для трав'яних пожеж.

**Методи досліджень.** Дослідження проводили за власною методикою на ділянках, засіяних пшеницею звичайною та житом посівним, у липні 2022 року на території Яворівського р-ну Львівської обл. В процесі роботи використовували такі прилади: рулетку вимірювальну, метеостанцію Kestrel 4000, фотокамеру цифрову Canon powershot a550, лабораторну сушильну шафу 2B151. Швидкість вітру, а також вологість атмосферного повітря вимірювали метеостанцією в межах шару рослин і висотою 0,5 м над його рівнем; вологість горючого матеріалу визначали за допомогою вагового методу [13], зваживши відібрані зразки надземних частин пшениці та жита відразу після зривання та після висушування у сушильній камері до абсолютно сухого стану за

температури  $100\pm 5^{\circ}\text{C}$  протягом 2 годин. Для моделювання пожеж використали модель та програмне забезпечення *WFDS*. Висоту зернових культур обирали, як у [12]: 20–100 см з інтервалом 10 см. Швидкість вітру в напрямі поширення пожежі вибирали 0, 1, 2 та 3 м/с.

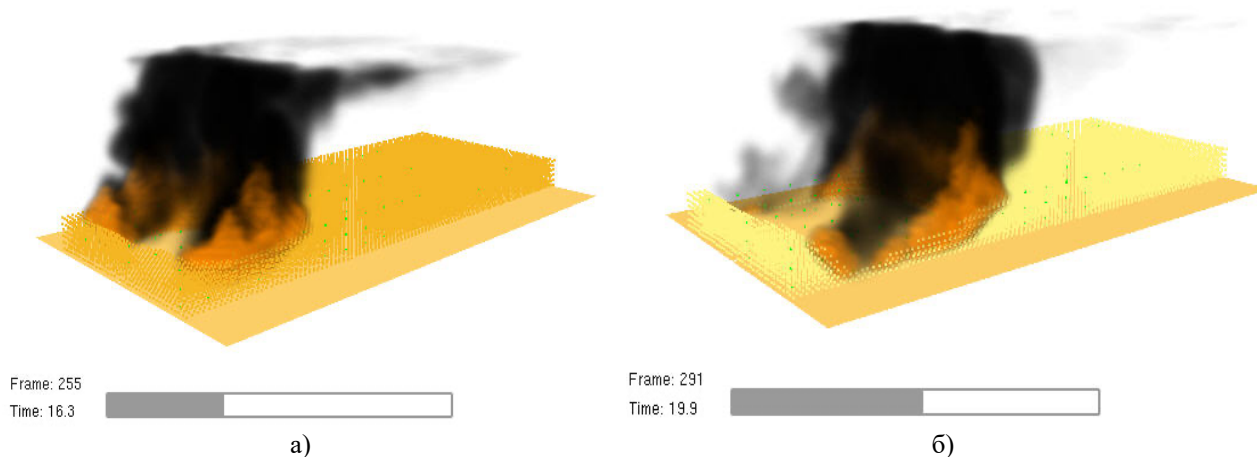
**Виклад матеріалу.** Виникнення пожеж пшениці звичайної (*Triticum aestivum L.*) та жита посівного (*Secale cereale L.*) зумовлене їх біологічними та фізичними властивостями. Ці рослини відносяться до родини злакових. Висота стебел пшениці може сягати до 125 см, а жита – до 200 см. Загальний ареал охоплює всі континенти земної кулі. В процесі росту найбільш поширених в Україні озимих сортів рослин налічують два періоди їх активної вегетації: осінній та весняно-літній (коли рослина дає врожай). Саме влітку за несприятливих погодно-кліматичних умов, зокрема посухи, зумовленої підвищеною температурою атмосферного повітря та відсутністю опадів, в таких агроценозах виникає стан підвищеної пожежної небезпеки.

Дослідження проводили для ділянок, засіяних пшеницею та житом. Форма ділянок – прямокутна, з горизонтальними розмірами  $10\times 4$  м. Для проведення моделювання у середовищі *WFDS* використали отримані під час польових досліджень фізичні властивості горючого матеріалу та метеорологічні умови, зокрема:

- початкова температура (температура повітря) —  $27,5^{\circ}\text{C}$ ;
- вологість матеріалу: пшениці —  $10\pm 1\%$ ;  
жита —  $11\pm 1\%$ ;
- щільність матеріалу: пшениці —  $450\text{ кг/м}^3$ ;  
жита —  $401\text{ кг/м}^3$ ;
- насипна щільність матеріалу: пшениці —  $0,550\text{ кг/м}^3$ ; жита —  $0,502\text{ кг/м}^3$ .

Окрім цього, задавали хімічний склад горючих матеріалів, інтенсивність тепловиділення, а також питому теплоту згоряння, відповідно до [6]. Подальші дії виконували за методикою, описаною в [12], а саме: підпал здійснювали на початку досліджуваної ділянки в одному місці; віртуальні термопари для визначення температур в зоні горіння встановлювали на висоті від 0–100 см від поверхні ґрунту; час моделювання встановили тривалістю 5 хв.

Розпочавши процес моделювання, спостерігали за моментом займання горючого матеріалу та поширенням пожежі впродовж загального часу симуляції з інтервалом 10 с. Швидкість поширення пожежі визначали згідно з [12]. Візуалізацію результатів моделювання пожеж у *WFDS* для пшениці та жита здійснювали у програмі *Smokeview* (рис. 2).



**Рисунок 2** – Візуалізація у *Smokeview* процесу поширення пожеж на ділянках, вкритих пшеницею (а) та житом (б) (висота рослин – 60 см, швидкість вітру – 1 м/с)

В процесі моделювання виявлено моменти нестійкого горіння, зокрема в ділянці підпалу на початку горючого шару рослин, особливо для рослин висотою 0,2 м за відсутності та низьких значень швидкості вітру. Проте, в більшості випадків горіння пшениці та жита поширилося на

усю площу ділянки, що підтверджується відповідними значеннями температур, отриманих із вихідних файлів *WFDS*. У табл. 1 наведено отримані за результатами моделювання середні швидкості поширення фронту пожежі в напрямку впливу вітру для ділянок досліджуваних рослин.

**Таблиця 1**

Середня швидкість поширення фронту пожежі пшениці та жита на дослідній ділянці залежно від їхньої висоти та швидкості вітру

Швидкість вітру, м/с	Швидкість поширення фронту пожежі, м/хв для різних висот зернових									
	Висота пшениці, м					Висота жита, м				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0	1,22	3,32	6,17	9,21	12,96	0,98	2,87	7,34	10,68	15,63
1	12,11	17,88	19,22	20,31	18,24	17,33	18,92	21,77	21,34	20,41
2	19,21	21,43	24,57	26,35	24,86	17,56	19,13	25,14	25,98	24,14
3	24,16	26,25	26,99	27,13	25,24	24,12	28,67	25,83	27,11	25,45

Результати показують, що за відсутності вітру швидкість поширення фронту пожежі для всіх рослин зростає із зростанням висоти шару рослин від 0,2 до 1 м. Для швидкостей вітру від 1 до 3 м/с швидкості поширення пожеж для всіх рослин також зростають із збільшенням висоти шару від 0,2 м до 0,8 м, а на висоті 1 м – дещо знижуються. Для жита швидкості поширення фронту пожежі є більшими за відповідні швидкості поширення пожеж посівів пшениці для швидкостей вітру 0 і 1 м/с. За швидкості вітру 2 м/с цей показник є більшим для посівів пшениці. Зокрема, для пожежі пшениці, висотою 0,4 м та за швидкості вітру 2 м/с, швидкість становила 21,43 м/хв, що в

1,12 раза перевищує відповідне значення за аналогічних умов для жита. А коли швидкість вітру становить 3 м/с, то практично немає різниці між швидкостями поширення фронту пожежі для обох культур. Для об'єктивності досліджень ми порівняли отримані дані із результатами пожежі трави відповідно до [12]. На підставі цих даних (див. табл. 1) та табл. 2 [12] побудовано залежності максимальних значень швидкостей поширення пожеж горючих рослинних матеріалів від їх висоти як найбільш небезпечних факторів з огляду на матеріальні збитки та шкоду для довкілля (рис. 3).



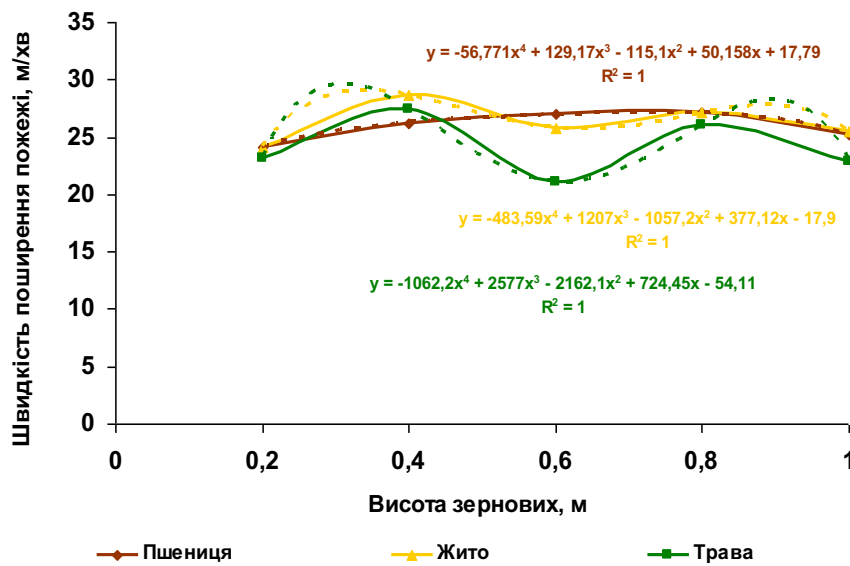


Рисунок 3 – Швидкості поширення пожеж досліджуваних зернових

Порівнюючи результати досліджень, отримуємо, що максимальні швидкості поширення фронту пожеж пшениці, жита та трави загалом є близькими і містяться у діапазоні 25-30 м/хв. Швидкість поширення фронту пожежі трави, починаючи з висоти 0,6 м, є дещо меншою, ніж жита і пшениці, окрім висоти 0,4 м, для якої цей показник незначно перевищує відповідне значення для пшениці на 1,21 м/хв. А швидкість поширення фронту пожежі ділянкою пшениці з висотою рослин 0,2 м була найнижчою.

Залежність швидкості пожежі жита  $v$ , м/хв від висоти рослин на ділянці найкраще може бути описана поліноміальною регресійною моделлю:

$v = -483,59x^4 + 1207h^3 - 1057,2h^2 + 377,12h - 17,9$ , з коефіцієнтом достовірності апроксимації  $R^2=1$ , де:  $h$  – висота рослини, см.

Регресійна залежність горіння пшениці описується формулою:

$v = -56,771x^4 + 129,17h^3 - 115,1h^2 + 50,158h + 17,79$  ( $R^2=1$ ).

Регресійна залежність горіння трави описується формулою:

$v = -1062,2x^4 + 2577h^3 - 2162,1h^2 + 724,45h - 54,11$  ( $R^2=1$ ).

Зауважимо, що проведення експериментальних досліджень для визначення швидкості поширення фронту пожежі в агроecosистемах було неможливим. Проте оскільки подібні

дослідження проводилися для трави і результати експериментів збігалися з моделлю.

Можемо вважати, що і у випадку агроценозів буде подібний результат, який надалі плануємо перевірити експериментально.

**Висновок.** Отже, програмне забезпечення *WFDS* доцільно використовувати не лише для дослідження пожеж у природних екосистемах з переважаючим трав'яним покривом, але й пожеж рослинних горючих матеріалів, які є посівними культурами та утворюють агроecosистеми – пшениці, жита тощо.

За результатами порівняння процесів моделювання пожеж на ділянках, вкритих пшеницею звичайною та житом посівним, із результатами дослідження трав'яних пожеж, встановлено:

– за висоти сформованого горючого рослинного матеріалу 0,8 м найбільша швидкість поширення пожежі властива пшениці звичайній і становить 27,13 м/хв;

– з усіх досліджуваних ділянок рослин висотою 0,4 м найбільша швидкість поширення пожежі властива для жита посівного (28,67 м/хв), що перевищує відповідні значення для трави та пшениці в 1,04 та 1,14 разів відповідно.

#### Список літератури:

1. Ahrens M. Brush, grass, and forest fires. Fire statistics and reports / National Fire Protection Association (NFPA) 2018. 8 p.
2. Спекта провокує пожежі на полях в Полтавській області. URL: <https://superagronom.com/news/7648-speka->

provokuye-pojeji-na-polyah-v-poltavskiy-oblasti (дата звернення 30.10.2022).

3. На Одещині горіло 2 га пшеничного поля: поліція розслідує підпал. URL: <https://suspilne.media/151178-na-odesini-gorilo-2-ga-psenicnogo-pola-policia-rozslidue-pidpal/> (дата звернення 30.10.2022).

4. Згоріло у 100 разів більше, ніж торік: окупанти спалили майже 600 гектарів пшениці на Донеччині, — ДСНС: URL: <https://freeradio.com.ua/zhorilo-u-100-raziv-bilshe-nizh-torik-okupanty-spalyly-maizhe-600-hektariv-pshenytsi-na-donechchyni-dsns/> (дата звернення 30.10.2022).

5. Про затвердження Правил пожежної безпеки в агропромисловому комплексі України: № 730/770 // Офіційний вісник України, 2007. 168 с.

6. Cruz M. G. et al. Fire behaviour modelling in semi-arid mallee-heath shrublands of southern Australia // *Environmental Modelling & Software*. 2013. N. 40. Pp. 21–34. DOI:10.1016/j.envsoft.2012.07.003

7. Gould, J. S. et al. Empirical-based models for predicting head-fire rate of spread in Australian fuel types // *Australian Forestry*. 2015. №. 3. Pp. 118–158. DOI/10.1080/00049158.2015.1055063

8. Mell W. et al. Computer modelling of wildland-urban interface fires // *Fire & Materials*. San Francisco. 2011. P. 36.

9. Frangieh N. et al. Numerical simulation of grassland fires behavior using an implicit physical multiphase model // *Fire safety journal*. 2018. № 102. Pp. 37–47. DOI:10.1016/J.FIRESAF.2018.06.004

10. Mell, W., Jenkins, M., Gould, J., Cheney, P. A physics-based approach to modeling grassland fires/ *International Journal of Wildland Fire*, 2007. № 16. Pp. 1–22. DOI:10.1071/WF06002

11. Товарянський В. І., Кузик А. Д. Дослідження пожежі молодих соснових насаджень. Пожежна безпека. Львів: ЛДУ БЖД, 2016. № 28. С. 113–120.

12. Кузик А. Д., Товарянський В. І., Драч К. Л. Моделювання процесів виникнення і поширення пожеж у трав'яних екосистемах. Пожежна безпека. Львів: ЛДУ БЖД, 2020. – № 36. С. 4–48. DOI:10.32447/20786662.36.2020.04

13. Nilsson L. O. *Methods of Measuring Moisture in Building Materials and Structures*/ Lund University. Sweden, 2008. 280 Pp.

#### References:

1. Ahrens, M. *Brush, grass, and forest fires. Fire statistics and reports*. National Fire Protection Association (NFPA), 2018, 8 Pp.

2. The heat provokes fires in the fields in the Poltava region. URL:

<https://superagronom.com/news/7648-speka-provokuye-pojeji-na-polyah-v-poltavskiy-oblasti> (accessed 30.10.2022).

3. 2 hectares of wheat field burned in Odessa region: police are investigating arson. URL: <https://suspilne.media/151178-na-odesini-gorilo-2-ga-psenicnogo-pola-policia-rozslidue-pidpal/> (accessed 30.10.2022).

4. 100 times more burned than last year: occupiers burned almost 600 hectares of wheat in Donetsk region, - State Emergency Service: URL: <https://freeradio.com.ua/zhorilo-u-100-raziv-bilshe-nizh-torik-okupanty-spalyly-maizhe-600-hektariv-pshenytsi-na-donechchyni-dsns/> (accessed 30.10.2022).

5. Fire safety rules in the agro-industrial complex of Ukraine. N 730/770. Information of the Verkhovna Rada. Kyiv: Official Gazette of Ukraine (2007).

6. Cruz, M. G., McCaw, W. L., Anderson, W. R., & Gould, J. S. (2013). Fire behaviour modelling in semi-arid mallee-heath shrublands of southern Australia. *Environmental Modelling & Software*, 40, 21-34. DOI:10.1016/j.envsoft.2012.07.003

7. Alexander, M. E., Gould, J. S., Sullivan, A. L., Cruz, M. G., McCaw, W. L., & Matthews, S. (2015). Empirical-based models for predicting head-fire rate of spread in Australian fuel types. *Australian Forestry*, 78(3), 118-158. DOI /10.1080/00049158.2015.1055063

8. Mell, W., McNamara, D., Maranghides, A., McDermott, R., Forney, G., Hoffman, C., & Ginder, M. (2011). Computer modelling of wildland-urban interface fires. *Fire & Materials*. San Francisco, 36.

9. Frangieh, N., Morvan, D., Meradji, S., Accary, G., & Bessonov, O. (2018). Numerical simulation of grassland fires behavior using an implicit physical multiphase model. *Fire safety journal*, 102, 37-47. DOI: 10.1016/J.FIRESAF.2018.06.004

10. Mell, W., Jenkins, M. A., Gould, J., Cheney, P. (2007). A physics-based approach to modeling grassland fires. *International Journal of Wildland Fire*, 16, 1-22. DOI:10.1071/WF06002

11. Tovarianskyi, V. I., & Kuzyk, A. D. (2016). Research on fire in young pine stands. *Fire Safety*, 28, 113-120.

12. Kuzyk, A. D., Tovarianskyi, V. I., & Drach K. L. (2020). Modeling of processes of occurrence and spread of fires In grass ecosystems. *Fire Safety*, 36, 46-48. DOI:10.32447/20786662.36.2020.04

13. Nilsson, L. O., & Jacobs. (2018). *Methods of measuring moisture in building materials and structures*. Springer International Publishing.