

*В. І. Товарянський, А. Д. Кузык, д-р с.-г. наук, професор  
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЖЕЖІ МОЛОДИХ СОСНОВИХ НАСАДЖЕНЬ**

Досліджено поширення пожежі в соснових молодняках – одних з найбільш пожежо-небезпечних лісових насаджень. Експериментальні дослідження проведені на сформованій ділянці лісу віком близько 8 років. Математичне моделювання експерименту проведене в моделі Wildland-Urban Fire Dynamics Simulator (WFDS). За результатами експерименту і моделювання встановлено, що низова пожежа на 13 с переходить у верхову. Отримані залежності відстані поширення полум'я від часу та значення швидкостей поширення. З використанням критеріїв Фішера та Стюдента встановлено рівність середніх значень швидкості та дисперсії, отриманих експериментально та за результатами моделювання, що підтверджує адекватність моделі WFDS для соснових молодняків.

**Ключові слова:** соснові молодняки, лісова пожежа, комп'ютерне моделювання.

*В.И. Товарянский, А.Д. Кузык*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЖАРА СОСНОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ В МОЛОДОМ ВОЗРАСТЕ**

Исследовано распространение пожара в сосновых молодняках - одних из самых пожароопасных лесных насаждений. Экспериментальные исследования проведены на сформированном участке леса возрастом около 8 лет. Математическое моделирование эксперимента проведено в модели Wildland-Urban Fire Dynamics Simulator (WFDS). По результатам эксперимента и моделирования установлено, что низовой пожар на 13 с переходит в верховой. Полученные зависимости расстояния распространения пламени от времени и значения скоростей распространения. С использованием критериев Фишера и Стюдента установлено равенство средних значений скорости и дисперсии, полученных экспериментально и по результатам моделирования, что подтверждает адекватность модели WFDS для сосновых молодняков.

**Ключевые слова:** сосновые молодняки, лесной пожар, компьютерное моделирование.

*V. Tovaryanskyi, A. Kuzyk*

### **RESEARCH OF FOREST FIRES IN YOUNG PINERIES**

Research of fires in young pineries which are one of the most fire dangerous was investigated. Experimental studies on the 8-year-old manually created forest area was held. Mathematical modeling of experiment was performed using Wild land-Urban Fire Dynamics Simulator (WFDS). Surface-to-crown fire transition was noted nearly after 13 seconds of the experiment and modeling in WFDS. Dependencies of flame spread distance on time and spreading velocity were obtained. According to the Fisher's and Student's criterias the equality of the average dispersions and the spreading velocities obtained experimentally and by the results of using the WFDS model for young pine stands was verified and validated.

**Key words:** young pineries, forest fires, computer modeling.

**Вступ.** Із багатьох антропогенних та природних факторів негативного впливу на довкілля істотне значення мають лісові пожежі, які призводять до екологічних та матеріальних втрат. Лісові пожежі – явище, яке залежить від значного числа факторів, зумовлених структурою насаджень, віком, станом окремих компонентів тощо. Дослідження таких пожеж є складним і не вирішеним загалом завданням. Найбільш пожежонебезпечними є молоді соснові насадження, у яких пожежі низові, як правило, переходять у верхові. Внаслідок цього дерева практично повністю знищуються. Тому дослідження таких насаджень потребує посиленої уваги. Актуальним завданням є дослідження процесів поширення лісової пожежі. Але експериментальні дослідження є складними та становлять небезпеку неконтрольованого поширення вогню. Тому поряд з ними часто застосовують різноманітні моделі, які дають можливість безпечно досліджувати це явище, отримувати результати, які допоможуть запобігати та ліквідувати лісові пожежі.

На теперішній час розроблено багато моделей лісових пожеж, зокрема математичних, фізичних, імітаційних, причому деякі з них є пакетами комп'ютерних програм. Огляд найпоширеніших моделей лісових пожеж проведено в [1-3]. Найбільш актуальними є фізичні моделі, в основі яких є системи диференціальних рівнянь в часткових похідних. Важливою передумовою практичного застосування таких моделей є їх перевірка на адекватність порівнянням результатів з реальною пожежею. Після позитивних результатів такої перевірки моделі можна застосовувати для дослідження лісових пожеж інших насаджень.

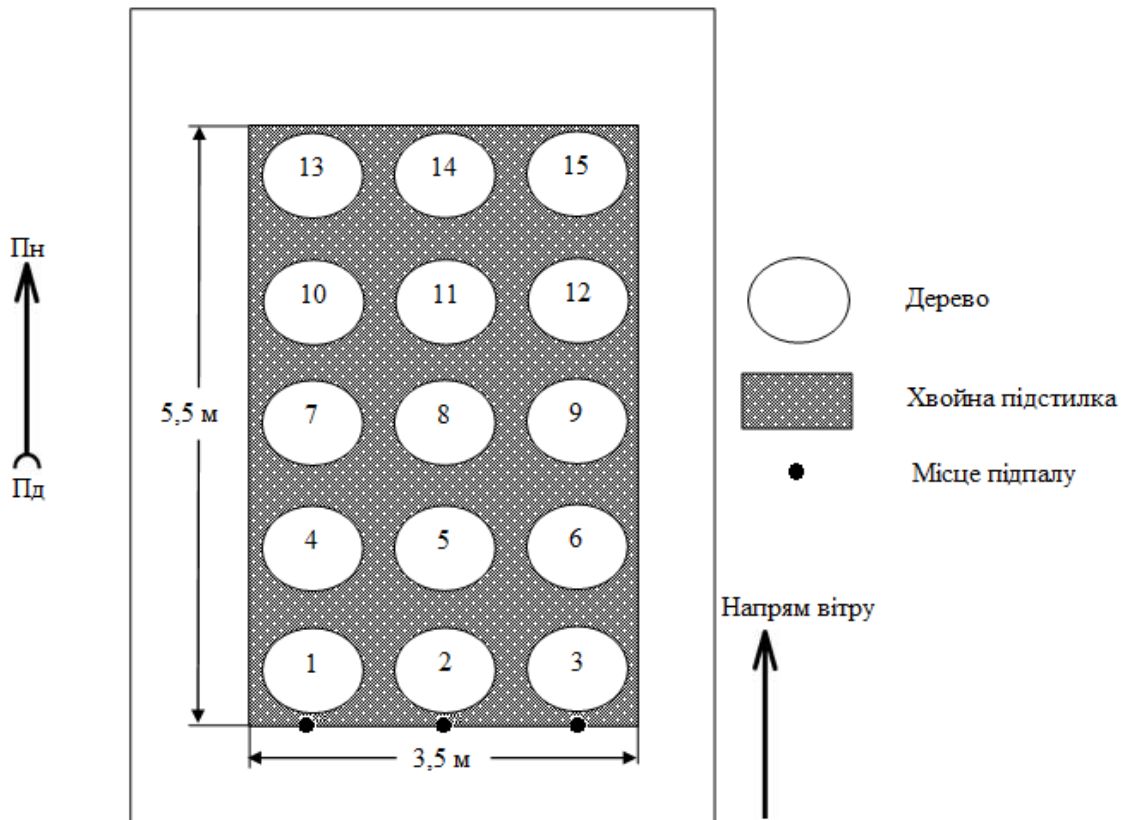
Однією з сучасних фізичних моделей є Wildland-Urban Fire Dynamics Simulator (WFDS) [4]. WFDS – розширений інтерфейс програмного середовища Fire Dynamic Simulator (FDS). Її застосовують для перевірки різноманітних гіпотез щодо поширення лісових та трав'яних пожеж [5-7]. Але валідації моделі проведено не надто багато. Відомими є дослідження трав'яних пожеж в Австралії [9] та лісових пожеж в Канаді [8], на основі яких проведено моделювання в WFDS з результатами, близькими до експериментальних. Але для соснових насаджень в Україні таких досліджень не проводилося.

**Метою роботи** є проведення експериментального дослідження лісової пожежі соснових насаджень молодого віку та використання його результатів для перевірки адекватності фізичної моделі WFDS з метою подальшого застосування моделі для дослідження пожеж у соснових лісах України.

**Прилади й методи.** Для експериментального етапу досліджень використовували рулетку, секундомір, метеостанцію Kestrel 4000, фотокамеру цифрову Canon powershot a550. Дослідження проводили на штучно створеній ділянці лісу. Моделювання пожежі здійснювали з використанням моделі WFDS на персональному комп'ютері з процесором Intel(R) Core i3 M330 2.13 GHz та оперативною пам'яттю 4,00 ГБ.

**Виклад матеріалу.** Експериментальні дослідження проводили влітку 2015 року на території Жовківського р-ну Львівської обл. Метеорологічні умови на час проведення досліджень: температура повітря +33 °С, відносна вологість повітря 23 %, вітер змінного напрямку 1 м/с, атмосферний тиск 744 мм рт.ст.

Ділянку лісу для проведення досліджень формували на місцевості з дотриманням умов безпеки та запобігання пожежі, враховуючи протипожежні відстані. Імітацію пожежі здійснювали з урахуванням протипожежних заходів та наявності засобів пожежогасіння. Ділянку формували з дерев, зрубаних на території поля, яке впродовж останніх 10 років не обробляється. Створено штучне насадження віком біля 8 років, середньою висотою 1,5 м та відстанню між сусідніми деревами 0,8 м. Як підстилку використано суху опалу хвою, зібрану в лісі неподалік від місця проведення експерименту. Товщина підстилки – до 3 см. Схема ділянки наведена на рис. 1. Підпал здійснювали в трьох місцях.



*Рисунок 1– Схема ділянки для проведення дослідження*

Фотографія ділянки на початку експериментальних досліджень зображена на рис. 2.



*Рисунок 2 – Досліджувана ділянка на момент підпалу та розповсюдження низової пожежі*

Для подальшої побудови моделі ділянки зафіксували геометричні розміри дерев, зокрема висоту, висоту нижніх віток та координати кожного дерева (табл. 1).

Геометричні розміри дерев досліджуваної ділянки

№	Висота дерева, см	Висота від нижньої вітки до підстилки, см
1	160	10
2	205	13
3	150	19
4	146	18
5	162	9
6	156	10
7	156	10
8	157	7
9	158	5
10	138	11
11	141	28
12	163	12
13	157	21
14	148	10
15	156	17

Наявність вітру, а також підвищена температура повітря сприяли швидкому поширенню полум'я підстилкою та виникненню низової пожежі уже на 5-ій секунді після підпалу. Перехід у верхову пожежу спостерігався на 13-ій секунді, причому крони та верхівки насаджень згорали нерівномірно. Підстилка згорала інтенсивно та практично повністю вигоріла. В процесі експерименту фіксували час та відстань, на яку поширювалось полум'я.

На 60-ій секунді горіння вогнем пройдено відстань 0,8 м, а на 120-ій – 1,2 м. В цілому горіння насаджень тривало до 180 с, по завершенню цього часу подекуди спостерігалось поодиноким догорання окремих фрагментів дерев. Ділянка після завершення експериментальної пожежі зображена на фото (рис. 3).



Рисунок 3 – Досліджувана ділянка після завершення експериментальної пожежі

На наступному етапі досліджень ми змоделювали цю пожежу у програмному середовищі WFDS та здійснили перевірку адекватності з урахуванням експериментальних результатів.

Моделювання пожежі за участю рослинних матеріалів здійснюється програмою WFDS безпосередньо у середовищі FDS. Для реалізації моделі окрім геометричних параметрів ділянки і дерев застосовуються фізико-хімічні властивості горючих матеріалів та мікрокліматичні умови (табл. 2)

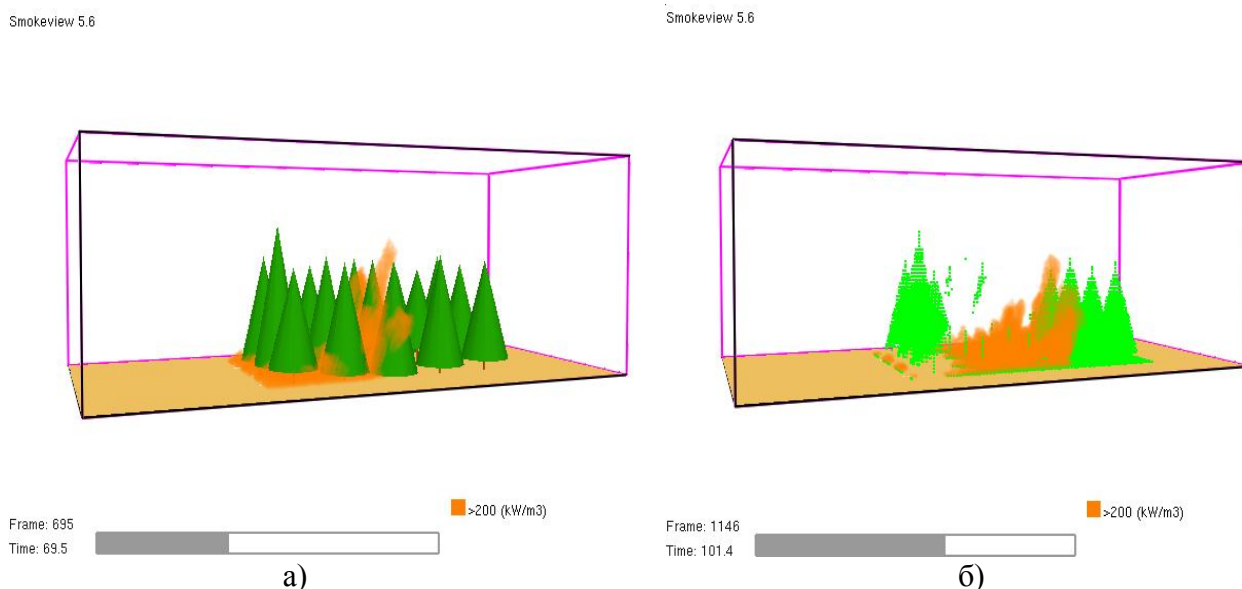
**Таблиця 2**

*Пожежонебезпечні властивості компонентів ділянки лісу*

Назва компонента	Початкова температура, °C	Відношення площі поверхні до об'єму	Вологість, %	Щільність, кг/м <sup>3</sup>	Насипна щільність, кг/м <sup>3</sup>
Лісова підстилка	33	4550	6	607	20
Крони дерев	33	4000	100	520	0,6
Стовбур	33	3	100	520	520

Інші значення параметрів моделі взято як стандартні. Для побудови використано також швидкість вітру, температуру повітря та параметри джерела запалювання. Моделювання здійснено на сітці розмірами 160x80x60, геометричні розміри домену 8x4x3 м. Хімічний склад горючого матеріалу рослинного походження –  $C_{3,4}H_{6,2}O_{2,5}$ ; теплота згорання – 17700 кДж/кг [10].

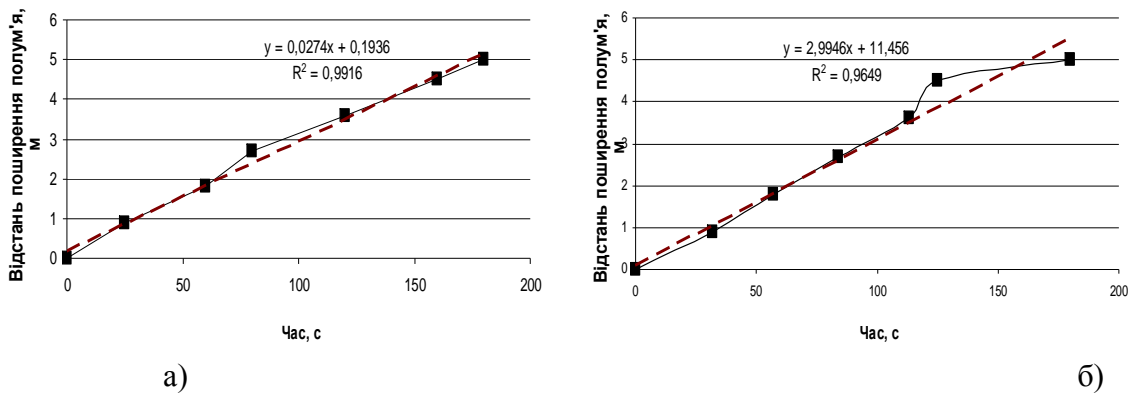
В процесі моделювання WFDS автоматично створює файли з результатами. Візуалізацію результатів розрахунку отримуємо програмою Smokeview, яка після завантаження файлу з розширенням .smv дає змогу переглядати перебіг процесу горіння у просторі (рис. 4).



**Рисунок 4** – Моделювання пожежі соснових насаджень у молодому віці:  
а) з завантаженими макетами дерев; б) з завантаженими частками Лагранжа, які формують структуру горючого матеріалу

Згідно з результатами моделювання, тривалість пожежі становила 170 с, що є близьким до відповідного значення, отриманого під час експериментальних досліджень у польових умовах.

Провівши обробку результатів експериментального дослідження та моделювання ми визначили залежність відстані поширення полум'я від часу горіння (рис. 5).



а) **Рисунок 5** – Залежність відстані поширення полум'я від часу горіння:  
а) отримана під час експерименту; б) отримана в результаті моделювання

Отримані залежності є близькими до лінійних. Це свідчить про те, що швидкість поширення пожежі є близькою до сталої. В процесі моделювання (рис. 5б). зафіксовано часткове відхилення залежності від прямої внаслідок різкого збільшення з незрозумілої причини інтенсивності горіння в момент поширення полум'я на 4-й ряд дерев на 120-й секунді горіння, чого не спостерігалось під час експериментального дослідження. Під час експериментальної пожежі вітер на 50-й секунді змінив напрям, спричинивши незначне зниження швидкості поширення полум'я (рис. 5а).

Для перевірки адекватності моделі WFDS експериментальним даним перевірили гіпотезу про рівність дисперсій швидкостей поширення пожежі, отриманих експериментально та за результатами моделювання (табл. 3), з використанням критерію Фішера. Емпіричне значення критерію  $F_{em} = 0,0030$  не перевищує критичного значення  $F_{\alpha, k_1, k_2} = F_{0,05, 5, 5} = 5,1$ , що свідчить про рівність дисперсій. Оскільки встановлено рівність дисперсій, тоді за t-критерієм Стьюдента перевірено гіпотезу про рівність середніх швидкостей поширення пожежі. Емпіричне значення критерію  $t_{em} = 0,263$  не перевищує критичне  $t_{\alpha, k} = t_{0,05, 10} = 2,23$ , що свідчить про рівність середніх швидкостей поширення пожежі та адекватність моделі.

**Таблиця 3**

*Швидкості поширення пожежі, отримані експериментально та за результатами моделювання у WFDS, їх середні значення та дисперсії*

Вид дослідження	Швидкість поширення пожежі, м/с						Середні швидкості, м/с	Дисперсії швидкостей, м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
	0,0360	0,0300	0,0337	0,0300	0,0281	0,0277		
Експеримент	0,0360	0,0300	0,0337	0,0300	0,0281	0,0277	0,0309	0,0370
Моделювання	0,0281	0,0315	0,0321	0,0319	0,0360	0,0278	0,0312	0,0310

**Висновок.** Проведені експериментальні дослідження у польових умовах та моделювання у WFDS підтверджують високу пожежну небезпеку молодих соснових насаджень та швидкий перехід пожежі з низової у верхову. З використанням критеріїв Фішера та Стьюдента до отриманих експериментально та з використанням моделі WFDS значень швидкості поширення пожежі доведено, що адекватність моделі для соснових молодняків робить можливим її використання для досліджень поширення лісових пожеж в соснових насадженнях.

### Список літератури:

1. Граб М. В. Моделі, методи та алгоритми розповсюдження лісових пожеж / М. В. Граб : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи . – Х. : Вид-во ХНУРЕ, 2004. – 21с
2. Кузик А. Д. Моделювання пожежної небезпеки лісів / А. Д. Кузик // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2011. – Вип. 21.16. – С. 104–112.
3. Храмов В. В. Моделювання лісових пожеж на grid-кластерах / В. В. Храмов, О. О. Судаков, М. В. Кононов, В. М. Устименко, М. М. Будник // Компютерні засоби, мережі та системи . – 2012. – №11. – С. 47–57.
4. Wildland-Urban Fire Models [Електронний ресурс] / – Режим доступу : <http://www.fs.fed.us/pnw/fera/wfds/index.shtml>
5. Mell W. Numerical simulations of grassland fire behavior from the LANL – FIRETEC and NIST – WFDS models / W. Mell, J. J. Charney, M. A. Jenkins, P. Cheney, J. Gould // For EastFIRE Conference, May 11 – 13, George Mason University 2005. – Режим доступу : [http://comet.ucar.edu/outreach/abstract\\_final/EastFIREConfProc/Abstracts/Session%201A%20PDF/1A\\_Mell.pdf](http://comet.ucar.edu/outreach/abstract_final/EastFIREConfProc/Abstracts/Session%201A%20PDF/1A_Mell.pdf)
6. Computer modelling of wildland-urban interface fires / W. Mell, D. McNamara, A. Maranghides, // Fire & Materials, San Francisco, CA, 31 Jan – 2 Feb 2011. 12 Pp. – Режим доступу : [https://www.firescience.gov/projects/07-1-5-08/project/07-1-5-08\\_Mell\\_et\\_al\\_FAM2011.pdf](https://www.firescience.gov/projects/07-1-5-08/project/07-1-5-08_Mell_et_al_FAM2011.pdf)
7. Menage D. Numerical simulations of fire spread in a *Pinus pinaster* needles fuel bed / D. Menage, K. Chetehouna, W. Mell // Journal of Physics: Conference series. – 2012. – vol.395, No 1. – Pp. 012011.
8. Landra Karolyi Trevis. Prototype development for a wildfire modeling and management system / A thesis submitted to the faculty of graduate studies in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. – Calgary, Alberta, 2005. – 126 pp.
9. Anderson D. H. Modelling the spread of grass fires / D. H. Anderson, E. A. Catchpole, N. J. De Mestre and T. Parkes // The Journal of the Australian Mathematical Society. Series B. Applied Mathematics. – 1982. – Vol. 23, Iss.04. – Pp. 451 – 466.
10. Mell W. User Guide to WFDS – this is a work in progress: [Електронний ресурс] / April 21, 2010. – 28 Pp. William (Ruddy) Mell. – Режим доступу : [http://www.fs.fed.us/pnw/fera/wfds/wfds\\_user\\_guide.pdf](http://www.fs.fed.us/pnw/fera/wfds/wfds_user_guide.pdf)

### References:

1. Hrab M. V. Modeli, metody ta alhorytmy rozpovsyudzhennya lisovykh pozhezh / M. V. Hrab : avtoref. dys. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tekhn. nauk : spets. 01.05.02 – matematychnе modelyuvannya ta obchyslyval'ni metody . – Kh. : Vyd-vo KhNУRE, 2004. – 21s
2. Kuzyk A. D. Modelyuvannya pozhezhnoyi nebezpeky lisiv / A. D. Kuzyk // Naukovyy visnyk NLTU Ukrayiny : zb. nauk.-tekhn. prats'. – L'viv : RVV NLTU Ukrayiny. – 2011. – Vyr. 21.16. – S. 104–112.
3. Khramov V. V. Modelyuvannya lisovykh pozhezh na grid-klasterakh / V. V. Khramov, O. O. Sudakov, M. V. Kononov, V. M. Ustymenko, M. M. Budnyk // Kompyuterni zasoby, merezhi ta systemy . – 2012. – #11 – S. 47–57.
4. Wildland-Urban Fire Models [Електронний ресурс] / – Режим доступу : <http://www.fs.fed.us/pnw/fera/wfds/index.shtml>
5. Mell W. Numerical simulations of grassland fire behavior from the LANL – FIRETEC and NIST – WFDS models / W. Mell, J. J. Charney, M. A. Jenkins, P. Cheney, J. Gould // For EastFIRE Conference, May 11 – 13, George Mason University 2005. – Режим доступу : [http://comet.ucar.edu/outreach/abstract\\_final/EastFIREConfProc/Abstracts/Session%201A%20PDF/1A\\_Mell.pdf](http://comet.ucar.edu/outreach/abstract_final/EastFIREConfProc/Abstracts/Session%201A%20PDF/1A_Mell.pdf)

6. Computer modelling of wildland-urban interface fires / W. Mell, D. McNamara, A. Maranghides, // Fire & Materials, San Francisco, CA, 31 Jan – 2 Feb 2011. 12 Pp. – Режим доступу : [https://www.firescience.gov/projects/07-1-5-08/project/07-1-5-08\\_Mell\\_etal\\_FAM2011.pdf](https://www.firescience.gov/projects/07-1-5-08/project/07-1-5-08_Mell_etal_FAM2011.pdf)
7. Menage D. Numerical simulations of fire spread in a *Pinus pinaster* needles fuel bed / D. Menage, K. Chetehouna, W. Mell // Journal of Physics: Conference series. – 2012. – vol.395, No 1. – Pp. 012011.
8. Landra Karolyi Trevis. Prototype development for a wildfire modeling and management system / A thesis submitted to the faculty of graduate studies in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. – Calgary, Alberta, 2005. – 126 pp.
9. Anderson D. H. Modelling the spread of grass fires / D. H. Anderson, E. A. Catchpole, N. J. De Mestre and T. Parkes // The Journal of the Australian Mathematical Society. Series B. Applied Mathematics. – 1982. – Vol. 23, Iss.04. – Pp. 451 – 466.
10. Mell W. User Guide to WFDS – this is a work in progress: [Електронний ресурс] / April 21, 2010. – 28 Pp. William (Ruddy) Mell. – Режим доступу : [http://www.fs.fed.us/pnw/fera/wfds/wfds\\_user\\_guide.pdf](http://www.fs.fed.us/pnw/fera/wfds/wfds_user_guide.pdf)

