



*Р. Ю. Сукач, В. В. Ковалишин, Я. Б. Кирилів, Д. П. Войтович*

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4174-9213> – Р. Ю. Сукач

<https://orcid.org/0000-0002-5463-0230> – В. В. Ковалишин

<https://orcid.org/0000-0002-6622-9209> – Я. Б. Кирилів

<https://orcid.org/0000-0002-2280-5585> – Д. П. Войтович



sukach.r@gmail.com

## СТВОРЕННЯ ЗАГОРОДЖУВАЛЬНИХ СМУГ ВОГНЕГАСНИМИ ПІНАМИ ПІДВИЩЕНОЇ СТІЙКОСТІ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ ПОШИРЕННЮ ТРАВ'ЯНИХ ПОЖЕЖ

В статті проаналізовано основні фактори, що впливають на виникнення та розповсюдження трав'яних пожеж, оскільки вони становлять суттєву загрозу. До таких факторів належать швидкість і напрям вітру, відносна вологість повітря, топографія, температура повітря, наявність сухого горючого матеріалу. На основі аналізу літературних джерел встановлено, що запобігти та протидіяти таким пожежам можна створенням загороджувальних смуг з піноутворювачів для гасіння пожеж, які містять поверхнево активні речовини та володіють високою змочувальною здатністю. У цій роботі вивчали створення ефективних загороджувальних смуг з піноутворювача підвищеної стійкості «Барс S-2» для запобігання поширенню трав'яних пожеж на луках і чагарниках, що було досягнуто вивченням відповідних параметрів при нанесенні таких смуг. Отже, основними параметрами, які вивчалися щодо швидкості поширення трав'яних пожеж, були кут ухилу поверхні, швидкість вітру, висота загороджувальної смуги на сухому трав'яному покриві в природних умовах за температури навколишнього середовища 22 °C у напівсонячний день, а також її ширина. Встановлено, що кут ухилу поверхні дуже сильно впливає на швидкість поширення полум'я сухим трав'яним покривом, причому чим більший кут тим вища швидкість. Аналогічний вплив має швидкість вітру на швидкість поширення полум'я. Визначено максимальну температуру полум'я за найсприятливіших умов горіння, яка становить 674 °C та величину теплового потоку – 19,74 кВт/м<sup>2</sup>. Також вивчено стійкість піни залежно від висоти її нанесення. Загалом, чим вище нанесено шар піни «Барс S-2» тим довше вона буде триматися на трав'яному покриві. Встановлено, що загороджувальна смуга із піноутворювача підвищеної стійкості для гасіння пожеж «Барс S-2» шириною 55 см ефективно запобігає розповсюдженню полум'я при найсприятливіших умовах для поширення полум'я.

**Ключові слова:** трав'яні пожежі, швидкість вітру, кут ухилу, піноутворювач підвищеної стійкості, загороджувальна смуга.

*R. Yu. Sukach, V. V. Kovalyshyn, Y. B. Kyryliv, D. P. Voytovych*

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

## CREATION OF BARRIER STRIPS WITH FIRE-EXTINGUISHING FOAMS OF HIGH RESISTANCE TO PREVENT THE SPREAD OF GRASS FIRE

The article analyses the main factors influencing the occurrence and spread of grass fires, as they pose a significant threat. These factors include wind speed and direction, relative humidity, topography, air temperature, and dry fuel. Based on the analysis of literary sources, it has been established that such fires can be prevented and counteracted by creating barrier strips from fire extinguishing foam concentrates that contain surfactants and have a high wetting ability. In this work, we studied the creation of effective barrier strips from the "Bars S-2" high-resistant foam concentrate to prevent the spread of grass fires in meadows and shrubs, which were achieved by studying the relevant parameters when applying such strips. Therefore, the main parameters that were studied in terms of the rate of propagation of grass fires were the angle of slope of the surface, wind speed, the height of the barrier strip on dry grass cover in natural conditions at an ambient temperature of 22 °C on a half-sunny day, as well as its width. It has been established that the slope angle of the surface greatly affects the speed of flame propagation by dry grass cover, and the larger the angle, the higher the speed. Wind speed has a similar effect on flame propagation speed. The maximum flame temperature under the most favourable

combustion conditions was determined, which is 674 °C and the heat flux is 19.74 kW/m<sup>2</sup>. The stability of the foam was also studied depending on the height of its application. In general, the higher the layer of "Bars S-2" foam is applied, the longer it will stay on the grass cover. It has been studied that a 55 cm wide barrier strip made of a general-purpose foam concentrate for extinguishing fires "Bars S-2" effectively prevents the spread of flame under the most favourable conditions for the spread of flame.

**Keywords:** grass fires, wind speed, slope angle, high-resistance foam agent, barrier strip.

**Постановка проблеми.** Пожежі на великих площах є одним із основних факторів довгострокових шкідливих змін природних екосистем і несприятливого впливу на умови проживання населення. Щорічно у багатьох країнах світу горить декілька сотень тисяч пожеж, які знищують ліси, чагарники, луки та торф'яники на площі в декілька мільйонів гектарів [1 – 5]. Окремо з цього переліку необхідно виділити луки і чагарники, які є важливими для збереження біорозмаїття рослин і тварин. Крім того, вони надають широкий спектр додаткових екосистемних послуг, включно із зв'язуванням вуглецю, боротьбою з паводками, пом'якшенням наслідків ерозії ґрунту і випасом худоби [6]. Луки і степи визначаються як екосистеми з густотою дерев до 10 од./га. Чагарники характеризуються як екосистеми з щільністю чагарників або напівчагарників не менше 30% покриття, плюс щільність дерев до 10 дерев на од./га [7]. Одним з основних факторів, що негативно впливають на луки і чагарники у всьому світі, є лісові пожежі [8].

Серед основних факторів, що визначають поведінку пожеж, найбільш важливим є кількість і якість горючого матеріалу, адже зростання кількості горючого матеріалу збільшує ймовірність загоряння, а тривалі посушливі періоди підвищують займістість і збільшують ймовірність лісових пожеж в цих екосистемах. У порівнянні з лісами доступність горючого матеріалу на луках і чагарниках низька; однак цей горючий матеріал дуже сухий. Тому інтенсивність пожеж на цих землях відносно низька [9], але вони швидко поширюються. Кількість доступного горючого матеріалу на луках і чагарниках коливається від 2 до 10 т/га, і все це згорає під час типової пожежі в екосистемі. Для порівняння, кількість доступного горючого матеріалу в лісистих місцевостях і лісових масивах коливається від 10-50 т/га до 200-1500 т/га, відповідно, з яких тільки 5-95% і 5-25%, відповідно, спалюються під час типової лісової пожежі. Переважаючі метеорологічні умови під час пожежі визначають її поведінку, зокрема швидкість і напрям вітру, а також відносну вологість повітря. У зв'язку з цим були визначені чотири діапазони швидкості вітру: (1) слабка: < 10 км/год; (2) помірна: 10-20 км/год; (3)

сильна: 20-30 км/год; і (4) екстремальна: > 30 км/год [10].

Серед метеорологічних умов найменший прямий вплив на ймовірність виникнення лісових пожеж має температура повітря [10]. Проте тепло, що виділяється під час лісових пожеж, може мати інший зворотний вплив, висушуючи приповерхневу рослинність на фронті пожежі, тим самим збільшуючи площу вигорання і збільшуючи ступінь пошкодження [9]. Крім того, топографія – ще один важливий фактор, що визначає розвиток пожежі. В цілому, чим крутіший ухил пагорба, тим швидше фронт вогню може просуватися вгору. Для цього були визначені три діапазони нахилу схилу: (а) пологий: <10%; (б) середній: 10-30%; і (в) крутий: > 30%. Сухі канали можуть вести себе як коридори вогню (навіть в напрямку, протилежному до напрямку вітру), в той час як лінії вододілів мають тенденцію зупиняти просування фронту вогню. Поєднання великої кількості сухого горючого матеріалу і «потрібних» метеорологічних і топографічних умов становить «багатообіцяючий рецепт» лісових пожеж [10, 11].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Багато країн, наприклад Австралія, США і Канада, Бразилія, європейські країни пережили катастрофічні пожежі, зокрема на луках і чагарниках, а їх рятувальні служби зіштовхнулись із складною задачею контролю над природною стихією, яка потребувала застосування багатьох рятувальних сил і більшої кількості засобів пожежогасіння [1, 3, 4, 12 – 14]. Окремо слід виділити трав'яні пожежі на луках та в лісах, де присутні трави на великих площах. Трава – найбільш поширений вид горючого матеріалу для лісових пожеж та пожеж в екосистемах. Такі пожежі швидко поширюються і можуть стати надзвичайно загрозливими для життя людей і їхнього майна. Трав'яні пожежі, як правило, виробляють набагато менше вугілля, ніж лісові пожежі та є вкрай небезпечними. Вогонь трав'яними покривами може переміщатися зі швидкістю до 25 кілометрів на годину, а в екстремальних обставинах – до 60 кілометрів на годину на відкритих луках. Такі пожежі, як правило, є менш інтенсивні, ніж лісові, проте вони все ж можуть генерувати величезну кількість променистого тепла. Чим вища і сухіша трава,

тим сильніше горить трав'яне багаття. Чим коротша трава, тим нижча висота полум'я і тим легше є контролювати вогонь. Пожежі на траві можуть початися днем раніше, ніж лісові пожежі, оскільки при високих температурах трава висихає швидше, ніж лісова підстилка.

Ці пожежі також становлять значну небезпеку для урбанізованих територій. Ефективна операція з гасіння пожежі потребує використання оптимальної техніки пожежогасіння та відповідного обладнання і засобів пожежогасіння. Невеликі пожежі можна гасити і наземними засобами пожежогасіння, а для великих пожеж необхідне залучення додаткових засобів, зокрема і авіації [15].

Вибір типу вогнегасної речовини залежить від величини, місця і інтенсивності пожежі. Вода – найбільш поширений засіб пожежогасіння; проте її ефективність низька, коли вона використовується для гасіння лісових пожеж, чагарників, лук, торф'яних боліт або диких земель [16] через її низьку здатність змочувати і проникати в тріщини гідрофобних поверхневих горючих матеріалів. Введення в воду поверхнево активних речовин (ПАР), що знижують поверхневий натяг води і підвищують змочувальну здатність гідрофобних поверхневих горючих матеріалів, є одним з найбільш ефективних способів боротьби з такими пожежами. Однак для кожного складу поверхневих горючих матеріалів існують свої оптимальні склади ПАР як в якісному, так і в кількісному відношенні [17, 18]. В даний час в якості ПАР (до 0,3%) застосовують: сульфанолю, піноутворювачі Барс S-1, Барс S-1m та ін.

Встановлено, що змочувальну здатність поверхневих горючих матеріалів можна підвищити в 2-3 рази, якщо використати для гасіння 1-3%-ні розчини карбонатів і бікарбонатів натрію [17, 18]. Ці розчини можуть застосовуватися не лише для підвищення ефективності гасіння лісових пожеж, чагарників, лук, торф'яних боліт або диких земель, а й для їх запобігання [17, 18]. Вогнегасні речовини на водній основі зазвичай використовуються в якості протипожежної піни для гасіння пожеж класу В [17]. Кожен тип засобів пожежогасіння на водній основі потребує відповідного обладнання для змішування концентрату з водою в необхідних пропорціях, а також належного обладнання та методів нанесення [18].

Змочувальні речовини або піна класу А (піноутворювач) підвищують ефективність води в якості засобу пожежогасіння завдяки зниженню поверхневого натягу води. Піна утримує воду в

контакті з незгорілим горючим матеріалом, щоб запобігти його загорянню, тоді як підземна пожежа в лісі потребує активнішого проникнення змочувального агента в підстилку [19]. У цьому дослідженні представлені результати полігонних випробувань із створення загороджувальних смуг піноутворювачем підвищеної стійкості «Барс S-2» для трав'яних пожеж в різних умовах. Сучасний підхід полягає у використанні поновлених з'єднань, легко біорозкладавальних поверхнево активних речовин, наприклад, складних ефірів поліетиленгліколю і жирних кислот (ПЕГ) або алкілполіглюкозидів (АПГ) [20, 21]. Піноутворювач підвищеної стійкості «Барс S-2» є біологічно м'яким (біологічна здатність до розкладання більше 80%) та придатним до використання у сучасних умовах.

**Метою роботи** є створення ефективних загороджувальних смуг з піноутворювача підвищеної стійкості для недопущення поширення трав'яних пожеж на луках і чагарниках, які буде досягнуто вивченням відповідних параметрів при нанесенні таких смуг. Для досягнення цієї мети необхідно експериментально дослідити параметри загороджувальних смуг з піноутворювача на трав'яних покривах у характерних метеорологічних та топографічних умовах.

**Матеріали, засоби і методи досліджень.** Установка для створення умов розповсюдження полум'я під кутом нахилу від 0 до 30°. Вимірювач температури РТ 0102-8 з програмним забезпеченням для ЕОМ, термоперетворювач ТХА діаметром 0,5 мм з діапазоном від -50 до 1200 °С. Вимірювач теплового потоку ВТП-01 з діапазоном від 0,1 до 50 кВт/кв. м. Пірометр «Смотрич 4ПМ1» для безконтактного вимірювання температури в діапазоні від 30 до 1200 °С. Анемометр НР-866В для вимірювання швидкості вітру в діапазоні від 0 до 20 м/с. Для досліджень використовували суху траву з вологістю 10%, яку визначали вологоміром ТК-100Н. Для імітації впливу вітру із швидкістю від 0,5 до 3 м/с використовували вентилятор ВН-2В, який нагнітав повітря у напрямку поширення полум'я. Швидкість обертання лопатей вентилятора змінювали регулятором швидкості. Для забезпечення сталої швидкості потоку, створеного вентилятором, його переміщали синхронно з переміщенням полум'я. Загороджувальні смуги створювали піноутворювачем підвищеної стійкості для гасіння пожеж «Барс S-2», який подавали піногенератором під тиском 6 атм. Основні технічні дані наведено в таблиці 1.

Основні технічні дані піноутворювача підвищеної стійкості для гасіння пожеж «Барс S-2»

№ з/п	Назва показника якості, розмірність	Норма за НД	Результати контролю
1	Масова частка осаду, %, не більше	0,25 без термодії; 1,00 після термодії	Без осаду
2	Кінематична в'язкість за 20 °С, мм <sup>2</sup> /с, не більше	50	7,25
3	Водневий показник (рН)	Від 6,5 до 10,0	7,32
4	Температура застигання, °С, не нижче	-10	-11
5	Густина, кг/м <sup>3</sup>	1000-1150	1038
6	Концентрація робочого розчину, % (об)	6	
7	Концентрація змочувального розчину, % (об)	0,5-1	
8	Корозійна активність, кг/(м <sup>2</sup> ·год)	Не більше 2	10-8
9	Стійкість до заморожування і розморожування	стійкий	стійкий
10	Кратність піни низької кратності, що утворюється з робочого розчину	20	20
11	Стійкість піни низької кратності, одержаної з робочого розчину, с, не менше	150	150
12	Кратність піни середньої кратності, що утворюється з робочого розчину	75	71
13	Стійкість піни середньої кратності, одержаної з робочого розчину, с, не менше	300	306
14	Кратність піни високої кратності, що утворюється з робочого розчину	600	600
15	Стійкість піни високої кратності, одержаної з робочого розчину, с, не менше	300	200
16	Тривалість гасіння піною середньої кратності модельного вогнища пожежі 55В1 за інтенсивності подавання робочого розчину піноутворювача (0,038÷0,004) дм <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·с), с, не більше	120	80,4
17	Показник вогнегасної здатності за класом пожежі В (підклас В1), кг/м <sup>2</sup> , не більше	5,1	3,1
18	Показник вогнегасної здатності за класом пожежі А, кг/м <sup>2</sup> , не більше	0,7	0,65
19	Критична інтенсивність подавання робочого розчину піноутворювача під час гасіння піною середньої кратності, дм <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·с), не більше	0,042	0,039
20	Показник змочувальної здатності змочувального розчину, с	Не більше 8	6
21	Температурний діапазон застосування, °С	Від 0 до 50	Від 0 до 50

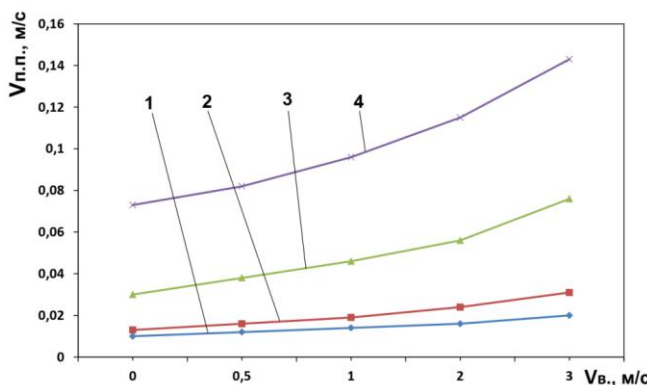
В цих дослідженнях оцінювалась придатність піноутворювача підвищеної стійкості для гасіння пожеж «Барс S-2» створювати загороджувальні смуги на трав'яних покривах. У полігонних умовах створювалась трав'яна смуга довжиною 2 м, шириною 40 см та висотою 21 см на спеціальній платформі (рис. 1).



**Рисунок 1** – Трав'яний покрив, створений в полігонних умовах для проведення експериментальних досліджень, із загороджувальною смугою з піноутворювача підвищеної стійкості для гасіння пожеж «Барс S-2»

Через двадцять хвилин після нанесення піноутворювача у вигляді загороджувальної смуги різної висоти та ширини, почалося загорання і поширення вогню по смузі і протипожежній перегородці. Вимірювали час протягом якого протипожежна смуга зупиняла розповсюдження полум'я і час протягом якого вона затримувала його перекидання.

**Виклад основного матеріалу.** В полігонних умовах вивчали вплив поширення полум'я вогню на трав'яних покривах залежно від швидкості вітру, топографії, тобто ухилу пагорба, параметрів загороджувальної смуги, а саме її ширини та висоти. Досліджено поширення полум'я на трав'яному покриві (рис. 2) при кутах нахилу 0°, 5°, 15° та 30° (криві 1 – 4) та швидкостях вітру від 0 до 3 м/с. З даного графіка видно, що із збільшенням кута ухилу трав'яного покриву швидкість поширення полум'я зростає, причому із зростанням кута інтенсивність її зростає з певним приростом. Аналогічний вплив спричиняє швидкість вітру, причому її зростання інтенсифікує процес поширення полум'я. Збільшення швидкості вітру та його напрям призводить до підвищення швидкості поширення полум'я із чи не найбільшим приростом.



**Рисунок 2** – Залежність швидкості поширення полум'я від швидкості вітру на трав'яних покриттях при кутах ухилу: 1 – 0°; 2 – 5°; 3 – 15°; 4 – 30°

Суттєвий інтерес представляє вивчення температурного режиму горіння трав'яного покриття за впливу різних факторів, зокрема кута ухилу та швидкості вітру, вологості, температури навколишнього середовища. Показано, що температура полум'я за найсприятливіших умов для горіння виміряна термопарами та пірометром відповідно становить 674 та 647 °С, причому ці значення є максимальними під час усього процесу горіння досліджуваної трав'яної смуги. Як видно, два різні прилади дають приблизно однакову максимальну температуру полум'я, при цьому похибка між їх показами становить лише 4%. Крім того, під час горіння трав'яного покриття за максимальної температури полум'я на відстані 50 см був зафіксований тепловий потік величиною 19,74 кВт/м<sup>2</sup>. Для створення перешкод поширенню вогню по трав'яних смугах створювали загороджувальні смуги піноутворювачем підвищеної стійкості для гасіння пожеж «Барс S-2» (рис. 3) різної висоти та ширини.



**Рисунок 3** – Поширення вогню по експериментальній трав'яній смузі та загороджувальна смуга із піноутворювача підвищеної стійкості для гасіння пожеж «Барс S-2»

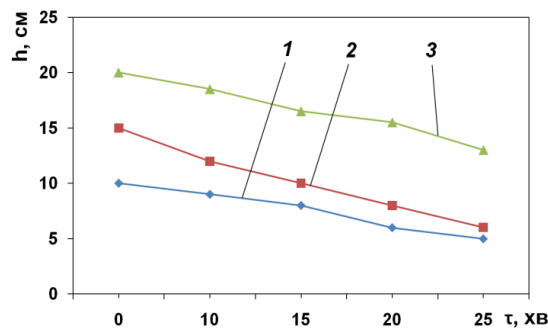
Щоб їх дослідити було проведено ряд експериментальних досліджень з визначення ефективних параметрів загороджувальних смуг створених піноутворювачем підвищеної стійкості для гасіння пожеж «Барс S-2».

Ці дослідження, як уже зазначалось вище, проводились за найсприятливіших умов для поширення полум'я. Для початку провели дослідження стійкості піни на сухому трав'яному покритті у природних умовах за температури навколишнього середовища 22 °С у напівсонячний день. Піну нанесли на створений у трьох розділених секціях трав'яний покрив. Висота шарів піни відповідно 10, 15 та 20 см (рис. 4).



**Рисунок 4** – Піна нанесена висотою 10, 15 та 20 см в трьох різних секціях

Потім визначали через 10, 15, 20 та 25 хвилин наскільки зменшиться висота піни «Барс S-2». Отримані залежності (рис. 5, криві 1, 2, 3) показують, що висота піни з плином часу знижується кожних 5 хвилин в основному на однакову висоту.



**Рисунок 5** – Залежність стійкості піни від висоти нанесення та часу: 1 – 10; 2 – 15; 3 – 20 см

Проте, на окремих ділянках висота піни зменшується то швидше, то повільніше. Загалом чим вищий нанесений шар піни «Барс S-2», тим довше вона буде триматися на трав'яному покритті. Це дозволить більш повно забезпечити проникнення змочувальних агентів в трав'яний покрив, що в свою чергу буде краще запобігати загорянню горючого матеріалу. Однак сама висота

нанесення загороджувальної смуги із піноутворювача підвищеної стійкості для гасіння пожеж «Барс S-2» очевидно не зможе забезпечити достатній захист без урахування необхідної ширини цієї смуги при найсприятливіших умовах для горіння трав'яного покриву. Тому необхідно дослідити необхідну ширину таких смуг, які зможуть запобігти перекиданню вогню на сусідню ділянку. Для цього беремо найсприятливіші умови поширення полум'я на трав'яному покриві, щоб провести такі дослідження. Експериментальним шляхом досліджуємо загороджувальні смуги різної ширини з піноутворювача підвищеної стійкості для гасіння пожеж «Барс S-2» за висоти 20 см, а саме: 10, 25, 40 та 55 см. Під час проведення досліджень зі смугою шириною 10 см та її витримкою після нанесення 15 хв і наступного підпалу виявлено, що вона стримувала поширення полум'я 52 секунди на відстані 95 см, проте через 1,5 хвилини полум'я перекинулося на трав'яний покрив за загороджувальною смугою. Після проведення аналогічного досліду з шириною смуги 25 см виявлено прорив через 5 хв. Наступною досліджували ширину смуги 40 см, проте явного прориву полум'я не відбулось, однак, декілька горючих частинок під впливом вітру 3 м/с перелетіли на трав'яний покрив. Це може становити загрозу при більш сприятливих умовах горіння. Тому були проведені дослідження зі смугою шириною 55 см, де перелітання окремих горючих частинок не було зафіксовано.

Із проведених досліджень ми бачимо, що із зростанням кута ухилу від 0 до 30° швидкість поширення полум'я по сухому трав'яному покриву зростає, причому чим вищий кут ухилу тим вища швидкість поширення. При зміні кута з 15 до 30° швидкість зростає у понад 2 рази. Наявність вітру додатково підвищує швидкість поширення полум'я, причому чим вища швидкість вітру тим вища швидкість поширення полум'я. Так, при куті ухилу 30° та швидкості вітру 3 м/с швидкість поширення полум'я зростає у понад 1,9 рази. Отримані нами результати добре узгоджуються із результатами, отриманими при схожих дослідженнях [22]. Визначена максимальна температура полум'я при горінні трав'яного покриву хоч і не є такою високою, як при горінні деревини, але таке полум'я має високу здатність до поширення, що може призвести до перекидання вогню з лук на ліси або поселення, близькі до них. Для запобігання та стримування таких пожеж запропоновано створювати загороджувальні смуги висотою 20 см піноутворювачем підвищеної стійкості для гасіння пожеж «Барс S-2» при висоті трав'яного покриву 21 см у полігонних умовах. Ефективність загороджувальної смуги із піноутворювача підвищеної стійкості для гасіння

пожеж «Барс S-2» підтверджено полігонними дослідженнями. Такий результат забезпечується наявністю в піноутворювачі поверхнево активних речовин, що підвищують змочувальну здатність та утримування на трав'яному покриві. Зрозуміло, що в природних умовах висота трав'яного покриву може бути різною і це буде потребувати нанесення загороджувальної смуги із піни також співрозмірної висоти. Також ширина смуги буде залежати напряму від висоти трави, топографії місцевості, погодних умов (особливо вітру). Тому надалі необхідно провести натурні випробовування на відкритій місцевості для перевірки отриманих результатів в полігонних умовах та для перевірки їх ефективності в реальних умовах. При полігонних дослідженнях помічено, що ширина загороджувальної смуги із піноутворювача підвищеної стійкості для гасіння пожеж «Барс S-2» має дуже велике значення, оскільки від цього буде залежати ефективність поширення та гасіння полум'я трав'яного покриву. В полігонних умовах встановлено, що загороджувальна смуга із піноутворювача підвищеної стійкості для гасіння пожеж «Барс S-2» шириною 55 см ефективно запобігає розповсюдженню полум'я при найсприятливіших умовах для поширення полум'я.

**Висновки.** Встановлено, що із зростанням кутів ухилу рельєфу місцевості від 0 до 30° зростає швидкість поширення полум'я по сухому трав'яному покриву, причому чим вищий кут ухилу, тим вища швидкість поширення. При зміні кута з 15 до 30° ця швидкість зростає у понад 2 рази. Наявність вітру додатково підвищує швидкість поширення полум'я. Так при куті ухилу 30° та швидкості вітру вздовж трав'яного покриву 3 м/с швидкість поширення полум'я зростає понад 1,9 рази у порівнянні з відсутністю вітру.

Максимальна температура полум'я за швидкості вітру 3 м/с, куті ухилу 30°, вологості горючого матеріалу 10% та температурі навколишнього середовища 22 °С становить 674 °С.

Показано, що чим більша висота шару нанесеної піни для створення загороджувальної смуги, тим довше вона тримається на трав'яному покриві. Це дає змогу більш повно забезпечити проникнення змочувальних агентів піни в трав'яний покрив, що свою чергу буде краще запобігати загорянню горючого матеріалу.

Встановлено в полігонних умовах, що ефективна ширина загороджувальної смуги із піноутворювача підвищеної стійкості для гасіння пожеж «Барс S-2» за висоти трав'яного покриву 21 см, швидкості вітру 3 м/с і кута куті ухилу поверхні землі 30° становить не менше 55 см. Загороджувальні смуги шириною менше 55 см є неефективними і допускають прорив полум'я.

### Список літератури:

1. Szczygieł R (2012) Wielkoobszarowe pożary lasów w Polsce (Large-area forest fires in Poland). *Fire Saf Tech* 26(1):67–78 (in Polish).
2. Liodakis S, Antonopoulos I, Kakardakis T (2010) Evaluating the use of minerals as forest fire retardants. *Fire Saf J* 45:98–10. doi: 10.1016/j.firesaf.2009.11.002
3. Gill AM, Stephens SL, Cary GJ (2013) The worldwide “wildfire” problem. *Ecol Appl* 23(2): 438–454. doi: 10.1890/10-2213.1
4. Penman TD, Nicholson AE, Bradstock RA, Collins L, Penman SH, Price OF (2015) Reducing the risk of house loss due to wildfires. *Environ Model Softw* 67:12–25. doi: 10.1016/j.envsoft.2014.12.020.
5. Jolly, W.M.; Cochrane, M.A.; Freeborn, P.H.; Holden, Z.A.; Brown, T.J.; Williamson, G.J.; Bowman, D.M.J.S. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nat. Commun.* 2013, 6, 7537.
6. Hao, R.F.; Yu, D.Y. Optimization schemes for grassland ecosystem services under climate change. *Ecol. Indic.* 2018, 85, 1158–1169.
7. Berg, N.; Perevolotsky, A. National Plan for Monitoring Biological Diversity in the Open Lands of Israel; Israel’s National Nature Assessment Program (HaMaarag): Jerusalem, Israel, 2010; Available online: [http://www.hamaarag.org.il/sites/default/files/media/file/report/field\\_report\\_report\\_file/%D7%AA%D7%9B%D7%A0%D7%99%D7%AA%20%D7%9C%D7%90%D7%95%D7%9E%D7%99%D7%AA%20%D7%9C%D7%A0%D7%99%D7%98%D7%95%D7%A8%20%D7%94%D7%9E%D7%92%D7%95%D7%95%D7%9F%20%D7%94%D7%91%D7%99%D7%95%D7%9C%D7%95%D7%92%D7%99.pdf](http://www.hamaarag.org.il/sites/default/files/media/file/report/field_report_report_file/%D7%AA%D7%9B%D7%A0%D7%99%D7%AA%20%D7%9C%D7%90%D7%95%D7%9E%D7%99%D7%AA%20%D7%9C%D7%A0%D7%99%D7%98%D7%95%D7%A8%20%D7%94%D7%9E%D7%92%D7%95%D7%95%D7%9F%20%D7%94%D7%91%D7%99%D7%95%D7%9C%D7%95%D7%92%D7%99.pdf) (accessed on 18 May 2019). (In Hebrew)
8. Jolly, W.M.; Cochrane, M.A.; Freeborn, P.H.; Holden, Z.A.; Brown, T.J.; Williamson, G.J.; Bowman, D.M.J.S. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nat. Commun.* 2013, 6, 7537.
9. Bond, W. Fires, Ecological Effects of. In *Encyclopedia of Biodiversity, Volume 2*; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2001; pp. 745–753.
10. KKL. Fire Fighting in Forests, Woodlands, and Open Lands; Keren Kayemet Le’Israel: Jerusalem, Israel, 2013; Available online: [http://www.kkl.org.il/files/hebrew\\_files/michrazim/bid-30-15-reference-document-8.pdf](http://www.kkl.org.il/files/hebrew_files/michrazim/bid-30-15-reference-document-8.pdf) (accessed on 18 May 2019). (In Hebrew)
11. Stavi, I. Wildfires in Grasslands and Shrublands: A Review of Impacts on Vegetation, Soil, Hydrology, and Geomorphology. *Water* 2019, 11(5), 1042; <https://doi.org/10.3390/w11051042>
12. Cahoon DR, Stocks BJ, Levine JS, Cofer WR, Person JM (1994) Satellite analysis of severe 1987 forest fires in northern China and southeastern Sibiria. *J Geophys Res* 99:18627–18638. doi: 10.1029/94JD01024
13. Calabri G (1980) The use of aircraft for forest protection against fire in Italy, trends in airborne equipment for agriculture and other areas. In: *Proceedings of a seminar organized by the United Nations Economic Commission for Europe, Warsaw, 18–22 September 1978*, pp 345–348. doi: 10.1016/B978-0-08-022425-1.50049-8
14. Hansen R (2012) Estimating the amount of water required to extinguish wildfires under different conditions and in various fuel types. *Int J Wildl Fire* 21:525–536. doi: 10.1071/WF11022
15. Salis M, Laconi M, Ager AA, Alcasena FJ, Arca B, Lozano O, Fernandes de Oliveira A, Spano D (2016) Evaluating alternative fuel treatment strategies to reduce wildfire losses in a Mediterranean area. *For EcolManag* 368:207–221. doi: 10.1016/j.foreco.2016.03.009
16. Rakowska, J., Szczygieł, R., Kwiatkowski, M. et al. Application Tests of New Wetting Compositions for Wildland Firefighting. *Fire Technol* 53,1379–1398 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10694-016-0640-0>
17. Сукач Р.Ю., Ковалишин В.В., Кирилів Я.Б. Зниження пожежної небезпеки торф’яників, торфорозробок та способи і протипожежне обладнання для підвищення ефективності їх гасіння. Пожежна безпека: збірник наукових праць 2019. №35. С 75-82. <https://doi.org/10.32447/20786662.35.2019.12>
18. Сукач Р.Ю., Ковалишин В.В., Кирилів Я.Б., Петровський В.Л., Сорочич М.П. Дослідження тактико-технічних характеристик спеціального пожежного ствола для гасіння підземних пожеж в екосистемах торф-ліс. Пожежна безпека: збірник наукових праць 2020. №36. С. 108-114. <https://doi.org/10.32447/20786662.36.2020.12>
19. International Association of Fire Chiefs, National Fire Protection Association (2012). *Fundamentals of firefighter skills*, Jones & Bartlett Publishers, Burlington, p 573.
20. Kjellin M (ed) (2010) *Surfactants from renewable resources*. Wiley, Chichester.
21. Wang P (2014) Application of green surfactants developing environment friendly foam extinguishing agent. *Fire Technol* 51:503–511. doi: 10.1007/s10694-014-0422-5.
22. Кузик А.Д. Еколого-лісівничі основи пожежної безпеки лісів Малого Полісся : монографія / Кузик А.Д. – Львів : СПОЛОМ, 2019. – 493 с.

### References:

1. Szczygieł R (2012) Wielkoobszarowe pożary lasów w Polsce (Large-area forest fires in Poland). *Fire Saf Tech* 26(1):67–78 (in Polish).
2. Liodakis S, Antonopoulos I, Kakardakis T (2010) Evaluating the use of minerals as forest fire retardants. *Fire Saf J* 45:98–10. doi: 10.1016/j.firesaf.2009.11.002

3. Gill AM, Stephens SL, Cary GJ (2013) The worldwide “wildfire” problem. *Ecol Appl* 23(2): 438–454. doi: 10.1890/10-2213.1
4. Penman TD, Nicholson AE, Bradstock RA, Collins L, Penman SH, Price OF (2015) Reducing the risk of house loss due to wildfires. *Environ Model Softw* 67:12–25. doi: 10.1016/j.envsoft.2014.12.020.
5. Jolly, W.M.; Cochrane, M.A.; Freeborn, P.H.; Holden, Z.A.; Brown, T.J.; Williamson, G.J.; Bowman, D.M.J.S. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nat. Commun.* 2013, 6, 7537.
6. Hao, R.F.; Yu, D.Y. Optimization schemes for grassland ecosystem services under climate change. *Ecol. Indic.* 2018, 85, 1158–1169.
7. Berg, N.; Perevolotsky, A. National Plan for Monitoring Biological Diversity in the Open Lands of Israel; Israel’s National Nature Assessment Program (HaMaarag): Jerusalem, Israel, 2010; Available online: [http://www.hamaarag.org.il/sites/default/files/media/file/report/field\\_report\\_report\\_file/%D7%AA%D7%9B%D7%A0%D7%99%D7%AA%20%D7%9C%D7%90%D7%95%D7%9E%D7%99%D7%AA%20%D7%9C%D7%A0%D7%99%D7%98%D7%95%D7%A8%20%D7%94%D7%9E%D7%92%D7%95%D7%95%D7%9F%20%D7%94%D7%91%D7%99%D7%95%D7%9C%D7%95%D7%92%D7%99.pdf](http://www.hamaarag.org.il/sites/default/files/media/file/report/field_report_report_file/%D7%AA%D7%9B%D7%A0%D7%99%D7%AA%20%D7%9C%D7%90%D7%95%D7%9E%D7%99%D7%AA%20%D7%9C%D7%A0%D7%99%D7%98%D7%95%D7%A8%20%D7%94%D7%9E%D7%92%D7%95%D7%95%D7%9F%20%D7%94%D7%91%D7%99%D7%95%D7%9C%D7%95%D7%92%D7%99.pdf) (accessed on 18 May 2019). (In Hebrew)
8. Jolly, W.M.; Cochrane, M.A.; Freeborn, P.H.; Holden, Z.A.; Brown, T.J.; Williamson, G.J.; Bowman, D.M.J.S. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nat. Commun.* 2013, 6, 7537.
9. Bond, W. Fires, Ecological Effects of. In *Encyclopedia of Biodiversity, Volume 2*; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2001; pp. 745–753.
10. KKL. Fire Fighting in Forests, Woodlands, and Open Lands; Keren Kayemet Le’Israel: Jerusalem, Israel, 2013; Available online: [http://www.kkl.org.il/files/hebrew\\_files/michrazim/bid-30-15-reference-document-8.pdf](http://www.kkl.org.il/files/hebrew_files/michrazim/bid-30-15-reference-document-8.pdf) (accessed on 18 May 2019). (In Hebrew)
11. Stavi, I. Wildfires in Grasslands and Shrublands: A Review of Impacts on Vegetation, Soil, Hydrology, and Geomorphology. *Water* 2019, 11(5), 1042; <https://doi.org/10.3390/w11051042>
12. Cahoon DR, Stocks BJ, Levine JS, Cofer WR, Person JM (1994) Satellite analysis of severe 1987 forest fires in northern China and southeastern Siberia. *J Geophys Res* 99:18627–18638. doi: 10.1029/94JD01024
13. Calabri G (1980) The use of aircraft for forest protection against fire in Italy, trends in airborne equipment for agriculture and other areas. In: *Proceedings of a seminar organized by the United Nations Economic Commission for Europe, Warsaw, 18–22 September 1978*, pp 345–348. doi: 10.1016/B978-0-08-022425-1.50049-8
14. Hansen R (2012) Estimating the amount of water required to extinguish wildfires under different conditions and in various fuel types. *Int J Wildl Fire* 21:525–536. doi: 10.1071/WF11022
15. Salis M, Laconi M, Ager AA, Alcasena FJ, Arca B, Lozano O, Fernandes de Oliveira A, Spano D (2016) Evaluating alternative fuel treatment strategies to reduce wildfire losses in a Mediterranean area. *For Ecol Manag* 368:207–221. doi: 10.1016/j.foreco.2016.03.009
16. Rakowska, J., Szczygieł, R., Kwiatkowski, M. et al. Application Tests of New Wetting Compositions for Wildland Firefighting. *Fire Technol* 53, 1379–1398 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10694-016-0640-0>
17. Sukach R., Kovalyshyn V., Kyryliv Y. «Reducing the fire hazard of peatlands, methods and fire-fighting equipment to increase the efficiency of their extinguishing» *Zbirnyk naukovykh prac «Pozhezhna bezpeka»*. 2019. №35, pp. 75-82. <https://doi.org/10.32447/20786662.35.2019.12>
18. Sukach R., Kovalyshyn V., Kyryliv Y., Petrovskii V., Sorochych M. «Study of the tactical and technical characteristics of a special fire barrel for extinguishing underground fires in peat-forest ecosystems» *Zbirnyk naukovykh prac «Pozhezhna bezpeka»*. 2020. №36, pp. 108-114. <https://doi.org/10.32447/20786662.36.2020.12>
19. International Association of Fire Chiefs, National Fire Protection Association (2012). *Fundamentals of firefighter skills*, Jones & Bartlett Publishers, Burlington, p 573.
20. Kjellin M (ed) (2010) *Surfactants from renewable resources*. Wiley, Chichester.
21. Wang P (2014) Application of green surfactants developing environment friendly foam extinguishing agent. *Fire Technol* 51:503–511. doi: 10.1007/s10694-014-0422-5.
22. Kuzyk A.D. (2019) *Ekologo-lisivnychi osnovy pozheznoi bezpeky lisiv Malogo Polissya [Ecological and silvicultural foundations of fire safety in the forests of Male Polissya]*, Spolom, Lviv, Ukraine.

© Р. Ю. Сукач, В. В. Ковалишин, Я. Б. Кирилів,  
Д. П. Войтович, 2022.

**Науково-методична стаття.**

Надійшла до редакції 07.05.2022.

Прийнято до публікації 17.05.2022.