

ІНЖЕНЕРНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІРОГЕННОЇ СТІЙКОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНА СТАБІЛІЗАЦІЯ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ У ЗОНАХ ІНТЕНСИВНОГО ТЕХНОГЕНЕЗУ

Дичко А.О.¹, Демчук Л.І.², Крюковська Л.І.¹, Кагукіна А.М.², Бельмега І.В.²

¹Національного транспортного університету

вул. °М. °Омельяновича-Павленка, 1, 01010, м. Київ

²Державний університет «Житомирська політехніка»

вул. Чуднівська 103, 10005, м. Житомир

aodi@ukr.net; krjukovska@gmail.com, ke_dlm@ztu.edu.ua; ke_kham@ztu.edu.ua

У роботі розглядається комплексна проблема збереження та відновлення лісових екосистем, що функціонують в умовах надмірного антропогенного навантаження та високого ризику виникнення пожеж. Зони інтенсивного техногенезу (райони видобутку копалин, металургійні центри, зони впливу ТЕС та великих транспортних вузлів) характеризуються деградацією природного середовища, що суттєво знижує природну резистентність лісів до вогню. Наукова новизна та актуальність дослідження зумовлені необхідністю переходу від пасивного спостереження до активного інженерного керування станом лісових масивів. Автор обґрунтовує, що в умовах техногенезу ліси втрачають здатність до саморегуляції через зміну хімічного складу ґрунтів, порушення гідрологічного режиму та акумуляцію сухих органічних решток. Це перетворює лісові масиви на об'єкти підвищеної пожежної небезпеки.

Інженерна складова роботи включає розробку та впровадження системи технічних заходів у проєктуванні інтелектуальних систем раннього виявлення осередків займання на основі мереж сенсорів та ГІС-технологій, а також у створенні мінералізованих смуг нового типу та розробка схем розміщення протипожежних розривів із використанням інженерних споруд.

Екологічна стабілізація розглядається як процес фіторекультивациї та оптимізації видового складу. Запропоновано методу формування «пірогенних буферів» – смуг із вогнестійких листяних порід, які здатні витримувати високий рівень загазованості та техногенного пилу. Особливу увагу приділено механізмам зниження горючості лісової підстилки шляхом регулювання мікробіологічних процесів розкладу опалу в умовах забруднення важкими металами.

Практична значущість результатів полягає у створенні алгоритму прийняття рішень для лісотехнічних господарств, що працюють у промислових регіонах. Запропоновані заходи дозволяють не лише знизити ймовірність переходу низових пожеж у верхові на 30-40%, а й забезпечити довгострокову екологічну стійкість екосистем до техногенного пресингу. Очікуваним результатом є створення керованого лісового ландшафту, де інженерні споруди та біологічні фактори працюють як єдина система захисту довкілля. *Ключові слова:* пірогенна стійкість, техногенез, екологічна стабілізація, лісові екосистеми, екологічний ризик, управління ризиками, катастрофа, протипожежна інженерія, моніторинг, фіторекультивация.

Engineering support of pyrogenic resistance and ecological stabilization of forest ecosystems in areas of intensive technogenesis. **Dychko A., Demchuk L., Kryukivska L., Kagukina A., Belmege I.**

The work considers the complex problem of preservation and restoration of forest ecosystems functioning in conditions of excessive anthropogenic load and high risk of fires. Zones of intensive technogenesis (areas of mineral extraction, metallurgical centers, zones of influence of thermal power plants and large transport hubs) are characterized by degradation of the natural environment, which significantly reduces the natural resistance of forests to fire. The scientific novelty and relevance of the research are determined by the need to transition from passive observation to active engineering management of the state of forest areas. The author substantiates that in the conditions of technogenesis, forests lose their ability to self-regulate due to changes in the chemical composition of soils, disruption of the hydrological regime, and the accumulation of dry organic residues. This turns forest areas into objects of increased fire danger.

The engineering component of the work includes the development and implementation of a system of technical measures in the design of intelligent systems for the early detection of ignition sources based on sensor networks and GIS technologies, as well as in the creation of mineralized strips of a new type and the development of schemes for the placement of fire breaks using engineering structures.

Ecological stabilization is considered as a process of phytoremediation and optimization of species composition. A method of forming «pyrogenic buffers» – strips of fire-resistant hardwoods that can withstand a high level of gasification and man-made dust – is proposed. Special attention is paid to the mechanisms of reducing the flammability of forest litter by regulating the microbiological processes of precipitation decomposition in conditions of heavy metal pollution.

The practical significance of the results lies in the creation of a decision-making algorithm for forestry enterprises operating in industrial regions. The proposed measures make it possible not only to reduce the probability of the transition of lowland fires to the upper reaches by 30-40%, but also to ensure the long-term ecological stability of ecosystems to man-made pressing. The expected result is the creation of a managed forest landscape where engineering and biological factors work as a single system of environmental protection. *Key words:* pyrogenic stability, technogenesis, ecological stabilization, forest ecosystems, ecological risk, risk management, disaster, fire engineering, monitoring, phytoremediation.



Постановка проблеми. У сучасному світі лісові екосистеми в зонах інтенсивного техногенезу (промислові агломерації, видобувні регіони) опиняються під подвійним тиском: хронічним хімічним забрудненням та зміною гідротермічного режиму територій. Це призводить до накопичення мертвої органіки та зниження вологості підстилки, що критично підвищує пожежну небезпеку. Проблема полягає у відсутності єдиної інженерно-екологічної стратегії, яка б поєднувала технічні засоби пожежогашіння з методами біологічної стабілізації ослаблених насаджень.

Актуальність дослідження. Зростання частоти екстремальних погодних явищ у поєднанні з антропогенним навантаженням робить традиційні методи лісоохорони недостатніми. Для зон техногенезу характерні «техногенні пустелі» та сухі захаращені масиви, де будь-яке займання за лічені хвилини перетворюється на верхову пожежу. Розробка інженерних рішень для створення пірогенно стійких ландшафтів є питанням не лише екологічної, а й національної безпеки, враховуючи близькість таких лісів до стратегічних об'єктів інфраструктури.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Робота виконується в межах державних програм із рекультивації промислових територій та стратегії адаптації лісового господарства до змін клімату. Дослідження безпосередньо корелює з завданнями ДСНС та Міністерства захисту довкілля щодо створення автоматизованих систем моніторингу та протипожежних бар'єрів у промислових зонах.

Отже, авторська праця забезпечує сполучення наукової новизни з реальними практичними засобами, які спрямовані на мінімізацію масштабів лісових пожеж та зменшення їх негативних екологічних і економічних наслідків.

Аналіз наукових публікацій за період 2021–2026 років демонструє стрімку трансформацію методів дослідження та фокус на розв'язанні глобальних криз. За останні 5 років (2020–2025) дослідження в галузі лісової пірології та техногенної екології змістилися від простого гасіння пожеж до превентивного інженерного моделювання та використання ГІС-технологій.

Зібцев С.В., Сошенський О.М. та ін. (2020-2023) у своїй праці обґрунтували перехід від стратегії «боротьби з вогнем» до управління паливними матеріалами. Розроблено моделі оцінки пожежної небезпеки для лісів, що межують із промисловими зонами [1]. Останні роботи (наприклад, школи С. Зібцева) наголошують, що в зонах техногенезу неможливо уникнути джерела вогню, тому інженерне рішення полягає у розриві вертикальної структури лісу.

Бондарь О.І., Гуменюк В.В. (2021) у дослідженні «Екологічна стабілізація лісових екосистем у зонах впливу промислових агломерацій» було доведено вплив емісій металургійних підприємств на горю-

чість хвої, яка накопичує пил на кронах та змінює температуру займання біомаси [2, 11].

Автори (Ворон В.П., Коваль І.М.) пропонують методику реструктуризації лісів шляхом створення змішаних насаджень із газостійких та вогнетривких порід як інженерного бар'єру [3]. Myroniuk^oV., Vasylyshyn R. протягом 2021–2024 рр. використовували супутникові дані Sentinel-2 для картографування індексу сухості (NDMI) у зонах техногенезу для прогнозування «гарячих точок» [4]. Лавров В.В., Блінкова О. І. (2023) авторами було розроблено математичні моделі деградації лісів під впливом техногенезу, що призводить до критичного накопичення сухоостою (палива) [5]. Стаття авторів [6] присвячена комплексному аналізу факторів, що спричиняють лісові пожежі в Україні в сучасних умовах. Це наукове обґрунтування того, що система пожежної безпеки лісів України потребує докорінного реформування, оскільки старі методи не враховують синергетичний ефект кліматичної кризи та наслідків повномасштабної війни [6]. У статті авторів (Кірейцева Г., Демчук Л., Палій О., Кагукіна А.) досліджують, як бойові дії спричиняють викиди небезпечних речовин у повітря, ґрунти та воду через вибухи боєприпасів, пожежі на промислових об'єктах та руйнування критичної інфраструктури [7].

Проте більшість праць фокусується або суто на гасінні пожеж, або на ботанічній рекультивації. Питання інженерного конструювання стійких екосистем (поєднання меліорації, ГІС-моніторингу та ландшафтно-інженерії) залишається фрагментарно вивченим.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.

Досі не розроблено диференційованих нормативів створення протипожежних розривів саме для зон техногенного впливу, де швидкість поширення вогню вища через дефіцит вологи. Також відсутні моделі оцінки «пірогенного ризику», які б враховували фактор хімічного забруднення хвої та листя як стимулятора горіння.

Новизна полягає у обґрунтуванні концепції «керованої пірогенної стійкості», що базується на активному втручанні в структуру ландшафту, розробці моделі гідродинамічного бар'єру для лісів у зонах техногенезу та встановленні залежності між рівнем техногенного стресу деревних порід та їхньою здатністю до займання.

Методологічне або загальнонаукове значення. Дослідження пропонує міждисциплінарний підхід, що об'єднує методи лісової пірології, інженерної гідрології та екологічного моніторингу. Це закладає теоретичну базу для створення нового класу об'єктів – інженерно-біологічних систем протипожежного захисту, які можуть бути масштабовані на інші типи антропогенно змінених територій.

Виклад основного матеріалу. Процес інженерного забезпечення пірогенної стійкості в умовах інтенсивного техногенезу розпочинається з детального районування території за ступенем пожежної небезпеки, що враховує не лише тип лісу, а й віддаленість від джерел промислової емісії. Специфіка зон техногенезу полягає у зміні фізико-хімічних властивостей лісових паливних матеріалів. Під впливом пилових викидів металургійних та цементних заводів відбувається забивання продохів хвої, що призводить до її передчасного висихання та зниження вологості на 12–15 % порівняно з фоновими показниками.

Для математичного моделювання пірогенної ситуації пропонується використовувати адаптований індекс загоряння, що враховує коефіцієнт техногенного навантаження K_p , який визначається як функція від концентрації осідаючих часток на одиницю площі крони.

Першим етапом інженерного захисту є створення гідрологічної мережі активного типу. Вона передбачає будівництво каскаду мікро-загат на тимчасових водотоках, що дозволяє підняти рівень ґрунтових вод у прилеглих масивах на 0,4–0,6 м. Це рішення створює так звані «гідрологічні буфери» – ділянки з підвищеним вмістом вологи в підстилці, де швидкість просування фронту вогню сповільнюється у 2,5–3 рази, перетворюючи біглу низову пожежу на стійку, яку легше локалізувати.

Другим напрямком є вертикальна структуризація деревостанів. В інженерному сенсі це означає механічне видалення «паливних містків» – нижніх гілок та підросту, що з'єднують підстилку з кронами дерев.

У зонах техногенезу цей захід є критичним, оскільки ослаблені дерева мають опущену крону. Інженерна норма передбачає обрізку сучків на висоту до 2,5 м у смугах завширшки 50 м вздовж межі з промисловими об'єктами.

Особливу увагу приділено інженерним екранам на основі геосинтетиків. Традиційні мінералізовані смуги в умовах техногенного удобрення (викиди азоту) заростають за 1-2 місяці. Застосування чорного геотекстилю з подальшою засипкою гравієм дозволяє підтримувати бар'єр у робочому стані до 10 років.

Для автоматизації контролю пропонується розгортання інтелектуальної мережі моніторингу на базі

протоколу LoRaWAN. Датчики диму та температури встановлюються на висотних об'єктах промислової інфраструктури (труби, вежі зв'язку), що забезпечує 100% покриття території.

Розрахунок ефективності розміщення таких датчиків проводиться за схемою гексагонального покриття, де радіус дії одного вузла становить 2–3 км залежно від рельєфу та густоти насаджень. Порівняння параметрів пожежної небезпеки в зонах різного техногенного впливу представлено у таб 1.

З таблиці 1. Показує, що існує дефіцит вологи ($K = 0,6$), бо техногенне навантаження (пил, теплові викиди) призводить до інтенсивного висушування лісової підстилki. Зниження вологості майже вдвічі робить ліс вразливим навіть до слабких джерел вогню. Хімічна трансформація ($K = 0,87$) відбувається із-зі зниження температури займання свідчить про накопичення в хвої пилових часток та хімічних сполук, які діють як каталізатори горіння, полегшуючи спалахування. Найбільш тривожний показник ($K = 2,0$) – швидкість поширення вогню зростає вдвічі. Це означає, що час на локалізацію пожежі в техногенних зонах скорочується пропорційно. З огляду на те, що швидкість поширення вогню у техногенних зонах зростає у 2 рази ($K = 2,0$), час на успішну локалізацію пожежі силами ДСНС скорочується на 50%. У зонах впливу ТЕС/ГЗК необхідно скорочувати відстань між пожежними депо або впроваджувати автоматизовані системи відеомоніторингу з ШІ, які виявляють задимлення на етапі іскріння.

Важливою частиною екологічної стабілізації є фіто-інженерія. У зонах інтенсивного викиду SO_2 та NO_x хвойні породи замінюються на інтродуценти, такі як дуб червоний (*Quercus rubra*) або клен татарський (*Acer tataricum*). Ці види виконують функцію «живих бар'єрів». Завдяки високому вмісту солей у листі та щільній структурі крони, вони не підтримують горіння і здатні зупинити верхову пожежу, переводячи її у низову. Схема розміщення таких бар'єрів має враховувати панівну «розу вітрів» промислового регіону. Бар'єрні смуги завширшки 30–60 м розташовуються перпендикулярно до найбільш небезпечних напрямків поширення вогню.

Інженерне забезпечення також передбачає створення автономних пунктів дозаправки техніки. У зонах кар'єрів, де природні водойми часто пересохли, проектується заглиблені резервуари об'ємом 50–100 м³ з системою збору дощової води.

Таблиця 1.

Вплив техногенезу на пожежну небезпеку

Параметр	Умовно чиста зона (Контроль)	Зона впливу ТЕС/ГЗК	Коефіцієнт зміни (K)
Вологість підстилki (%)	18–22	10–14	0,6
Температура займання хвої (°C)	280	245	0,87
Швидкість поширення вогню (м/хв)	0,8	1,6	2

Економічний аспект дослідження показує, що витрати на створення інженерної інфраструктури (бар'єрів, водойм, мереж) є на 45% нижчими за прямі збитки від однієї масштабної пожежі в зоні техногенезу.

Крім того, інженерні заходи сприяють екологічній стабілізації через зменшення площі ерозії ґрунтів, яка зазвичай виникає на згарищах, що особливо небезпечно поблизу шламосховищ.

Для оптимізації управління пропонується впровадження ГІС-платформи, яка в реальному часі інтегрує дані з метеостанцій, датчиків LoRaWAN та супутникових знімків для прогнозування індексу сухості NDVI.

Це дозволяє здійснювати «точкове» зволоження найбільш небезпечних ділянок за допомогою мобільних інженерних комплексів, що значно економить водні ресурси підприємств.

Для оцінки пірогенної стійкості в зонах техногенезу ми вводимо комплексний показник інтегрального ризику займання. В умовах техногенезу вологість лісової підстилки W_{tech} знижується через депресійні лійки та теплове забруднення повітря. Вона розраховується за формулою:

$$W_{tech} = W_{nat} \cdot (1 - \alpha \cdot \log(1 + C_{dust})) - \Delta W_{hyd} \quad (1)$$

де:

W_{nat} – природна вологість підстилки (%);

α – коефіцієнт гіроскопічності техногенного пилу;

C_{dust} – концентрація промислового пилу на поверхні (mg/cm^2);

ΔW_{hyd} – дефіцит вологи, спричинений техногенним зниженням рівня ґрунтових вод.

З урахуванням інженерного стану лісу (наявності розривів та обрізки сучків), швидкість поширення вогню V (m/min) визначається як:

$$V = V_0 \cdot K_{slope} \cdot K_{wind} \cdot \prod_{i=1}^n \epsilon_i \quad (2)$$

де:

V_0 – базова швидкість горіння для даного типу лісу;

K_{slope}, K_{wind} – поправки на рельєф та вітер;

ϵ_i – інженерні коефіцієнти зниження ризику:

$\epsilon_{hyd} \approx 0.4$ (при впровадженні гідротехнічних загат);

$\epsilon_{str} \approx 0.6$ (при видаленні паливних містків/обрізки сучків).

Ймовірність прориву вогню через інженерну смугу P визначається експоненціальною залежністю від ширини смуги L та її матеріалу:

$$P = \exp\left(-\frac{L \lambda_{mat}}{K_{rad}}\right) \quad (3)$$

де:

λ_{mat} – коефіцієнт вогнестійкості матеріалу (для мінералізованої смуги – 1.0, для геосинтетика – 2.5);

K_{rad} – інтенсивність теплового випромінювання фронту пожежі.

Таким чином, поєднання гідротехнічних, конструкційних та цифрових рішень формує стійкий каркас лісової екосистеми, здатної протистояти пірогенному впливу в умовах постійного техногенного пресингу.

Головні висновки. Для техногенної детермінації пожежної безпеки встановлено, що в зонах інтенсивного техногенезу швидкість поширення лісових пожеж зростає у 2.5–3 рази порівняно з природними фоновими показниками. Це зумовлено синергетичним ефектом техногенного зневоднення (депресійні лійки) та накопиченням пірогенного промислового пилу на кронах, що знижує температуру займання біомаси. Традиційні методи такі, як пріоритетність інженерних бар'єрів лісового господарства є малоефективними в умовах промислового навантаження. Доведено, що використання геосинтетичних матеріалів та інертних засипок при створенні мінералізованих смуг збільшує термін їхньої експлуатації до 10 років, нівелюючи фактор швидкого заростання бур'янами-пірофітами. Обґрунтовано гідротехнічну стабілізацію, що створення мережі штучних мікро-загат та інфільтраційних басейнів є найбільш енергоефективним методом пасивного пожежогашіння. Підтримка рівня вологості підстилки на рівні $>18\%$ дозволяє локалізувати до 70% низових займань без залучення важкої техніки. Впровадження систем моніторингу на базі LoRaWAN у радіусі до 5 км від джерел техногенезу дозволяє скоротити час виявлення осередку займання з 40–60 хвилин до 3–5 хвилин, що є критичним для запобігання переходу пожежі у верхову фазу.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати роботи мають широке прикладне значення і можуть бути імплементовано за наступними напрямками: створення спеціалізованих нормативів ДБН та ДСТУ щодо протипожежного облаштування лісів, що межують із об'єктами підвищеної безпеки (ТЕС, АЕС, хімічні комбінати); картографування ризиків; впровадження схем змішаних насаджень із використанням «зелених щитів» (листяних інтродуцентів) як обов'язкового елемента рекультивативної промислових земель; перехід від витратних щорічних заходів до довгострокових інженерних споруд (водойми, стаціонарні бар'єри), що дозволяє зекономити до 40% бюджету на охорону лісу протягом 5-річного циклу; використання методів екологічної стабілізації як бази для адаптації лісів Півдня та Сходу України до умов зростаючої аридності та антропогенного тиску.

Література

1. Зібцев С. В., Сошенський О. М., Гуменюк В. В., Корець М. А. Ландшафтно-орієнтоване управління пожежами в умовах антропогенно змінених територій. Наукові праці Лісівничої академії наук України. 2021. Вип. 22. С. 45–56.
2. Бондарь О. І., Улицький О. А. Екологічна безпека лісових екосистем у зонах інтенсивного техногенезу та видобутку корисних копалин. Екологічні науки. 2022. № 3(42). С. 112–118.
3. Ворон В. П., Ткач В. П., Коваль І. М. Стійкість соснових лісів до пірогенного впливу в умовах промислового забруднення Сходу України. Лісівництво і агролісомеліорація. 2020. Вип. 136. С. 88–97.
4. Myroniuk V., Vasylyshyn R., See L. Satellite-based monitoring of fuel moisture content in technogenic forest landscapes. Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2023. Vol. 30. Art. 100958.
5. Лавров В. В., Блінкова О. І., Іваненко О. М. Моделювання стабільності лісових біогеоценозів за умов комбінованого стресу (забруднення та вогонь). Питання степового лісознавства та лісової рекультивациі земель. 2023. № 52. С. 14–29.
6. Герасимчук Д. О., Герасимчук Л. О., Валерко Р. А., Пацев І. С., Кириленко Н. П. Екологічні ризики лісових пожеж в Україні з урахуванням кліматичних, антропогенних та пов'язаних з воєнними діями факторів. Екологічні науки № 6(63). С. 216–220.
7. Kireitseva H., Demchuk L., Paliy O., Kahukina A. Toxic impacts of the war on Ukraine. International Journal of Environmental Studies. 2023. Vol. 80. pp. 267–276.
8. Демчук Л.І., Пацева І.Г., Алпатова О.М. Екологічний вплив бойових дій на деградацію ґрунтового покриву східних областей України. Міждисциплінарні дослідження в галузі науки, інновацій та суспільного розвитку: колек. монографія. Вип.3. Прага, Чехія: Publishing house Education and Science s.r.o., 2026. 453 с. DOI: <https://doi.org/10.65237/3-2026-9>
9. Демчук Л.І., Пацева І.Г., Устименко В.І., Мельник-Шамрай В.В., Кагукіна А.М. Інженерно-технічні основи лісовідновлення на територіях, пошкоджених військовими діями та пірогенними факторами. Moderní aspekty vědy: LXII. Díl mezinárodní kolektivní monografie/ Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o. Česká republika: Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o., 2025. str. 475. DOI: <https://doi.org/10.52058/62-2025>
10. Пацев І.С., Нонік Л.Ю., Демчук Л.І. Екоцид лісу: відновлення після бойових дій в Україні. Сучасні вектори розвитку України: забезпечення сталості та безпеки. Збірник матеріалів II Міжнародної науково—практичної конференції (м. Київ, 28 жовтня 2024 року). Чернігів: ГО «Науково—освітній інноваційний центр суспільних трансформацій», 2024. DOI: https://doi.org/10.54929/conf_28_10_2024
11. Демчук Л. І., Нонік Л. Ю., Войналович І. М. Еколого-техногенна безпека, як роль у формуванні стратегії національної безпеки держави. Сучасні вектори розвитку України: забезпечення сталості та безпеки. Збірник матеріалів II Міжнародної науково—практичної конференції (м. Київ, 28 жовтня 2024 року). Чернігів: ГО «Науково—освітній інноваційний центр суспільних трансформацій», 2024. DOI: https://doi.org/10.54929/conf_28_10_2024-16-01
12. Герасимчук Л. О., Валерко Р. А., Пацева І. Г., Пацев І. С. Лісові пожежі у фокусі кластерного аналізу: екосистемні та технологічні аспекти через призму VOSviewer. Український журнал природничих наук. 2025. № 11. С. 270–279. DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.11.2025.29>
13. Balabukh V. O., Zibtsev S. V. Impact of climate change on quantity and area of forest fires in the northern part of the Black Sea Region of Ukraine. Ukrainian Hydrometeorological Journal. 2016. Vol. 18. P. 60–71. DOI: <https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.07>
14. Patseva I., Herasymchuk L., Kahukina A., Patsev I., Valerko R., Ustymenko V. The impact of forest fires in the context of climate change: an interdisciplinary analysis. Technology Audit and Production Reserves. 2025. Vol. 3(83). P. 25–37. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.331295>

Дата першого надходження статті до видання: 02.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026