

DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.05>*А. М. Домінік¹, Ю. М. Нагірняк¹, Д. В. Фреюк²**¹Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна**²Львівський національний університет ветеринарної медицини
та біотехнологій імені С. З. Гжицького,
м. Львів, Україна*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0139-2002> – А. М. Домінік<https://orcid.org/0000-0001-9966-5560> – Ю. М. Нагірняк<https://orcid.org/0000-0001-7076-3431> – Д. В. Фреюк✉ dominik.andrij@gmail.com

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ ВІД ОСЕРЕДКУ ПОЖЕЖІ НА НАВКОЛИШНІ ОБ'ЄКТИ

Розвиток технічного процесу створює нові фактори небезпеки пожежі. Поряд із цим велика увага рятувальників зосереджена на процесах розвитку й поширення горіння. Але не менш важливої уваги потребує й питання теплового ефекту пожежі. Явище теплового опромінення навколишнього середовища сприяє прискоренню процесу розповсюдження горіння. Виникає фактор небезпеки для навколишніх людей, адже при дії такого випромінювання з певним значенням на незахищені частини тіла людини може виникати ураження шкіри, опіків тощо.

Метою роботи є дослідження процесу розповсюдження теплового впливу від факелу пожежі залежно від різних обставин і чинників. Методом аналізу відомі наукові дослідження негативного впливу та способів захисту від теплових потоків.

Для проведення дослідження використовували теоретичні аспекти, що включали аналіз відомих публікацій і результатів експериментів.

З'ясовано, що питання негативного впливу теплової дії розглянуто й вивчено в багатьох роботах різних авторів. У статті проаналізовано та представлено дослідження науковців щодо питання розповсюдження теплових потоків, шкоди, що завдає теплове навантаження, а також математичного моделювання теплових процесів. Поряд із цим вивчено захисні властивості водяної завіси, створеної розпиленним струменем пожежного ствола.

Незважаючи на значний обсяг дослідження процесу теплообміну, питання захисту чи зменшення теплового навантаження залишається відкритим і не дослідженим повною мірою. Так, значну увагу дослідники приділили саме процесу пошкодження будівель і конструкцій від негативного впливу тепла, менше уваги – вивченню теплового навантаження та зменшенню потужності теплового потоку. Проте залишається забутиим захист пожежно-рятувальної техніки, що використовується в безпосередній близькості до полум'я пожежі. Усе це спричиняє пошкодження транспортного засобу й можливе подальше займання.

У ході дослідження встановлено, що науковці виконали чимало роботи для дослідження залежності зміни й негативного впливу теплового випромінювання. Однак питання захисту пожежної техніки від впливу теплового випромінювання під час гасіння пожеж залишається поза увагою, що створює часом приховану та додаткову небезпеку для особового складу. Саме тому за допомогою аналізу досліджень встановлено необхідність дослідження й упровадження відповідних інноваційних технологій захисту.

Ключові слова: тепловий потік, пожежа, факельне горіння, пожежно-рятувальна машина, тепловий вплив пожежі, теплообмін, водяна завіса.

ANALYSIS OF RESEARCH ON THE NEGATIVE INFLUENCE OF HEAT FLOW FROM THE FIRE CENTER ON THE SURROUNDING OBJECTS

The development of the technical process creates new fire hazards. Along with this, much rescuers' attention is focused on the processes of development and spread of combustion. But the issue of the thermal effect of fire requires no less attention. The phenomenon of thermal irradiation of the environment promotes the acceleration of the process of combustion spread. This creates a hazard factor for people around, because when such radiation is exposed to unprotected parts of the human body with a certain value, skin lesions, burns, etc. can occur.

The purpose of the study is studying the process of heat propagation from a fire plume depending on various circumstances and factors. The method of analysis is based on well-known scientific studies of the negative impact and methods of protection against heat flows.

Theoretical aspects were used to conduct the research, including the analysis of known publications and experimental results.

It has been found that the issue of the negative impact of thermal effects has been considered and studied in many works by different authors. The present work analyzes and presents the research of scientists on the propagation of heat fluxes, the damage caused by thermal load, as well as mathematical modeling of thermal processes. Moreover, the protective properties of the water curtain created by the sprayed jet of a fire hose are studied.

Despite a significant amount of research on the heat transfer process, the issue of protecting or reducing the heat load remains open and has not been fully explored. Thus, researchers have paid much attention to the process of damage to buildings and structures from the negative effects of heat. Less attention has been paid to the study of heat load and reduction of heat flow power. However, the protection of fire and rescue equipment used directly in the vicinity of the fire remains forgotten. All this causes damage to the vehicle and possible further ignition.

The research has shown that scientists have done a lot of work to study the dependence of changes and negative effects of thermal radiation. However, the issue of protecting firefighting equipment during emergency response from this hazard remains unaddressed, which sometimes creates a hidden and additional danger to personnel. That is why, based on the analysis of research, the need for research and implementation of appropriate innovative protection technologies has been established.

Key words: heat flow, fire, flaring, fire-rescue vehicle, thermal effect of fire, heat exchange, water curtain.

Постановка проблеми. Щоденний розвиток технічного процесу дає змогу суспільству адаптуватися до нових технологій. Проте поряд із цим залучаються дедалі небезпечніші сполуки чи речовини, що створюють загрозу життю та здоров'ю. Одним із факторів небезпеки впродовж усього розвитку залишається процес неконтрольованого горіння. Пожежа, що розповсюджується у відкритому просторі, створює чималу загрозу оточенню.

Одним із найнебезпечніших факторів, що досі залишається не вивченим повною мірою, є тепловий ефект. Висока температура горіння матеріалів дає змогу поширюватися вогню без жодних перешкод, створюючи небезпеку й для рятувальників. Поряд із цим тепловому ефекту піддаються й пожежні машини, які опиняються неподалік осередку горіння.

Мета статті (постановка завдання) – провести аналіз і дослідити процес вивчення проблеми розповсюдження теплового впливу від факелу пожежі залежно від різних обставин і чинників,

визначити і проаналізувати відомі наукові дослідження негативного впливу та способів захисту від теплових потоків.

Основним методом проведення дослідження є аналіз і викладення результатів досліджень науковців, що стосуються поширення й небезпеки теплового випромінювання.

Виклад основного матеріалу. У відкритих ресурсах зазначається, що теплове випромінювання – це явище, яке виникає в результаті взаємодії обертового й коливального руху атомів і молекул, із яких складаються речовини. Практично кожне тіло має теплове випромінювання, у зв'язку з тим що його температура перевищує абсолютний нуль.

Теплове випромінювання в різних його проявах багато досліджували відомі науковці як України, так і за кордоном. Так, наприклад, можна відзначити, що вчені [1] вивчали основні характеристики ліній теплового потоку. На основі проведених експериментальних досліджень для

одновимірною, двовимірною і тривимірною теплообміну декількох джерел тепла запропоновано метод, що дає змогу оптимізувати контроль і керування тепловими потоками в системах, що об'єднують декілька джерел тепла.

Дослідження характеристик теплообміну тепловими потоками також висвітлено науковцями [2]. В основу наукових експериментів авторами покладено вивчення перехідних характеристик теплопередачі теплового потоку на початковій стадії теплообміну, що дає можливість створити модель для дослідження зміни теплового потоку всередині тіла за періодичних теплових граничних умов. За допомогою цієї моделі досліджено відмінності між перехідним і сталим теплообміном, проаналізовано причини впливу частоти періодичного теплового потоку, теплопровідності й питомої теплоємності на перехідні характеристики теплообміну.

Поряд із процесом теплообміну між тепловими потоками іноземні й українські вчені зосереджують увагу на вивченні небезпеки теплового потоку саме від пожежі. Так Т. В. Костенко, А. І. Березовський та О. В. Костирка вивчали небезпеку теплового навантаження на рятувальників під час ліквідації наслідків масштабних пожежі, що включає зовнішні й внутрішні шляхи нагрівання. На основі аналізу залежності теплового навантаження від відстані встановлено переважаючі теплові потоки від дії пожежі, обґрунтовано залежність для оперативної оцінки променевого теплового потоку при горінні нафтопродуктів у резервуарах і подано вираз для розрахунку безпечних зон ведення аварійних робіт поблизу нафтопродуктів, що палають у резервуарах [3].

Дослідженню питання процесу теплообміну й випромінювання від факелу пожежі присвячено працю [4], де розглянуто та викладено різновидності взаємного розміщення будівельних конструкцій і площини полум'я, проаналізовано кутові коефіцієнти випромінювання і ступінь чорноти тіла. Дослідженнями виявлено залежність величини температурного поля від часу й товщини опромінюваної поверхні.

Процеси теплообміну значно поширені в усіх сферах функціонування суспільства, проте досить важливим і небезпечним фактором теплообміну є під час пожежі. Так, у праці [5] створено математичні моделі та проведено обчислювальні експерименти для встановлення конкретних параметрів, що впливають на температурний режим пожежі у вертикальному тунелі. У ході досліджень визначено динаміку зміни температури при відомих геометричних параметрах і пожежному навантаженні.

У дослідженнях, що представлено в роботі [6], визначали залежність теплового потоку від факторів величини й віддалі. Установлено, що величина теплового потоку, який падає на зовнішню поверхню пожежного модуля, досліджуваного в роботі, залежить від температури полум'я та ступеня чорноти досліджуваних об'єктів. При збільшенні віддалі між ним, а також зменшенні висоти факела величина теплового потоку різко зменшується.

Поряд із залежністю величини теплового потоку від віддалі й величини науковці звертають увагу на залежності від геометричних параметрів полум'я пожежі. Так, учені [7] шляхом кількісної оцінки й вивчення геометрії полум'я та властивостей теплопередачі отримали залежності між вітровим потоком і тепловою передачею, визначили швидкості зміни параметрів полум'я залежно від сили вітру, на основі чого створили фізичну модель.

Дослідженням розвитку пожеж займалася немала кількість науковців. Так, у праці [8] автори вивчали взаємодію двох лінійних пожеж, що зливаються, залежно від зміни вітрового й теплового потоку. На основі досліджень автори встановили залежність збільшення теплового потоку від сили вітру, а також швидкості й імовірності злиття полум'я стосовно заданих параметрів. Поряд із цим зі збільшенням швидкості тепловиділення кут нахилу полум'я збільшується на етапі повного злиття двох фронтів пожежі.

Однією зі сфер дослідження теплового потоку є аналіз і вивчення процесу його розподілу. Так, у праці [9] іноземні дослідники вивчали процес теплового випромінювання за різних умов вільного потоку. У ході експериментів кількісно визначено конвективний і радіаційний складники теплового потоку полум'я, що дало змогу розробити методіку кількісної оцінки складників теплового потоку з урахуванням локальних масових швидкостей вигорання й локальних градієнтів температури.

Під час ліквідації пожежі як іноземні, так й українські рятувальні підрозділи зосереджують значну увагу на захист суміжних об'єктів від теплового впливу, що знаходяться поряд з осередком пожежі. Так, для дослідження процесу теплопередачі між суміжними об'єктами проведено чимало досліджень, серед яких й українськими науковцями. Наприклад, у праці [10] автор зосередив увагу на експериментальному вивченні теплового випромінювання від джерела у вигляді пожежі на сусідні елементи будівель і конструкцій. Результати досліджень дали змогу провести верифікацію математичних моделей

теплообміну між сусідніми об'єктами, що створюють основу методології визначення протипожежних відстаней.

Подальші дослідження теплопередачі між сусідніми об'єктами проведено в роботі [11]. Автори розрахували моделі експериментальних досліджень і запропонували методику, де продемонстровано зразок, що дає змогу імітувати вплив теплового випромінювання на фрагмент конструкції під час пожежі. Поряд із цим ця методика містить обґрунтовані точки розміщення дослідних зразків, що дає можливість визначити найбільш інтенсивні місця нагрівання й інтенсивності теплового випромінювання.

Унаслідок повномасштабного вторгнення російського агресора, здійснення обстрілів по об'єктах критичної інфраструктури відбулося збільшення кількості пожеж на складах зберігання нафтопродуктів. Пожежам на складах зберігання нафтопродуктів, а також процесу ліквідації пожеж на цих підприємствах присвячено немало досліджень. Зокрема, вивченню та моделюванню такого типу пожеж присвячені роботи науковців таких, як М. М. Семерак, С. В. Поздєєв, Р. С. Яковчук, В. В. Чернецький, М. Р. Михайлишин. Автори в одній із робіт представили математичне моделювання теплообміну в резервуарному парку нафтопродуктів і спрогнозували на основі цього шляхи можливого поширення пожежі [12].

Досить часто поширення пожежі ускладнює для рятувальників процес її ліквідації. Саме тому це питання широко досліджують науковці в різних галузях та умовах. Так, у роботі [13] представлені напрацювання щодо дослідження поведінки полум'я на похилій поверхні, впливу на температуру, теплового потоку й розподілу швидкостей під час поширення пожежі. За допомогою результатів дослідження встановлено залежність швидкості зростання температурних показників і теплового потоку від кута нахилу поверхні, на якій відбувається процес поширення полум'я пожежі.

Дослідження негативного впливу теплового випромінювання безпосередньо супроводжується процесом вивчення способів зменшення інтенсивності теплового випромінювання, що дає змогу забезпечити захист навколишніх об'єктів чи рятувальників. Один із методів зменшення потужності теплового потоку вивчено в роботі [14]. Основні дослідження автор спрямовує на захисні властивості води, використовуючи гідродинамічні характеристики ствола, що водночас подає суцільний струмінь води на гасіння й утворює захисну водяну

завісу. Як результат дослідження представлено математичне моделювання екрануючої здатності завіси, встановлено залежність коефіцієнта екранування теплового потоку захисною водяною завісою, а також енергії теплового потоку від товщини завіси й запропоновано для вивчення нові закономірності екранування теплового потоку.

Подальші дослідження захисних властивостей водяних струменів різних типів висвітлили в працях науковці О. А. Гаврилко та Б. О. Білінський. Так, наприклад, у роботі [15] автори проаналізували причини трансформації водяних струменів у повітрі та дослідили вплив водяних струменів в'язлого типу на тепловий захист рятувальника під час пожеж. Результат роботи дає змогу визначити теоретичну залежність з урахуванням одночасної дії сили поверхневого натягу й сили в'язкості на стійкість струменя.

Поряд із найпростішими способами захисту від теплового випромінювання продовжуються дослідження захисних властивостей пасивного захисту. Так, у роботах А. Я. Шаршанов вивчає основні особливості захисної дії поглинаючих і відбиваючих екранів і покриттів; покриттів із матеріалу, що спучується; неоднорідних покриттів. Автор запропонував рішення нестационарної теплопровідності при нагріванні тонкого шару, порівняв коефіцієнти пропускання теплового потоку, що дало йому змогу отримати комплекс математичних моделей для опису процесів захисту, виявлення особливостей цих процесів, а також розробки алгоритмів і програмного забезпечення для вирішення прикладних завдань захисту [16].

Щодня рятувальні підрозділи ДСНС України здійснюють не менше ніж 100 виїздів на ліквідацію пожежі, що виникають на різних об'єктах навколишнього середовища, спричинені як наслідками військових дій країною-агресором, так і суцільними діями. Поряд із проривом науково-технічного та промислового прогресу, важливу роль в успішному виконанні завдань за призначенням визначає правильне розміщення сил і засобів, що також дає змогу захистити їх від негативного впливу теплового ефекту. Так, українські науковці дослідили оптимізацію вибору безпечного місця розташування пожежних машин і спеціального обладнання. Для досягнення отриманих результатів у працях опрацьовано відомі методики прогнозування поширення пожежі й запропоновано власну методику для визначення необхідної кількості, а також правильного місця розташування сил і засобів у ході ліквідації масштабних пожеж в екосистемах [17].

Підсумовуючи проаналізовані наукові дослідження та напрацювання, можна стверджувати, що процес теплового випромінювання й теплообміну є одним із основних факторів небезпеки для суміжних об'єктів, включаючи спеціальні транспортні засоби підрозділів ДСНС, що залучаються до гасіння пожеж.

Світова спільнота постійно і стрімко рухається в напрямі пошуку альтернативних та екологічно чистих джерел енергії, у тому числі й для транспорту, що щодня лише посилюється та прискорюється. Ця тенденція відображена в поширенні впровадження використання електромобілів у міжнародних пожежних підрозділах. Проте використання електробатарей досить чутливе до теплового випромінювання, потребує використання в сприятливих температурних режимах. Так, у працях [18–19] автор досліджує основні фактори, що сприяють виникненню пожеж на автомобілях, особливо електричних. Отримані результати дають змогу встановити часові межі температури самозаймання ізоляційних матеріалів електромережі, а також визначити пожежне навантаження на навколишнє середовище методом математичного моделювання динаміки розвитку пожежі.

Висновки. Отже, явище теплового ефекту проаналізовано й розглянуто не одним науковцем, проте питання безпеки теплового випромінювання все ще залишається не дослідженим повною мірою. Більшість досліджень спрямовані на визначення величини теплової дії на будівельні конструкції, які відносно можна вважати стаціонарними (якщо не враховувати переміщення самого полум'я в процесі горіння).

Проте, незважаючи на численні дослідження, досі не вивчено захист пожежних машин від теплового потоку залежно від зміни відстані або взаємного розташування машини й джерела теплової дії. Разом із тим пожежна машина має можливість маневрувати, як наслідок, змінювати тривалість перебування в небезпечному середовищі.

Проаналізувавши конструкції пожежних машин, виявили, що не всі елементи конструкції однаково піддаються тепловому впливу, що дає змогу виокремити такі конструктивні елементи й удосконалити їх характеристики або передбачити їх захист. Удосконалення конструкції пожежних машин має вагомое значення для забезпечення безпечної експлуатації останніх, що виконують свої функції під час гасіння пожеж. Важливість збереження пожежних машин заслуговує на проведення відповідних досліджень і впровадження відповідних інноваційних технологій захисту.

Список літератури

1. Yide Yang, Xin Chen, Mali Gong, Jianshe Ma, Research on the division of heat dissipation spaces for multiple heat sources based on the adiabatic characteristic of heat flow lines *Applied Thermal Engineering*. 2024. Vol. 257. Part B. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124263>.
2. Qi Deng, Hua Chen, Changpeng Yang, Xin Zhao, Wen-long Cheng, Study on transient heat transfer characteristics of heat flow under low frequency periodic thermal boundary conditions. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2024. Vol. 159. Part A. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108021>.
3. Костенко Т. В., Березовський А. І., Костирка О. В. Прогнозування теплового навантаження на рятувальників під час гасіння пожеж у резервуарах з нафтопродуктами. *Пожежна безпека* : збірник наук. праць. Львів : ЛДУ БЖД. 2017. № 30. С. 91–98.
4. Семерак М. М., Домінік А. М., А. В. Субота Теплові потоки, зумовлені випромінюванням факела пожежі. *Пожежна безпека* : збірник наук. праць. Львів : ЛДУ БЖД. 2011. № 19. С. 131–136.
5. Serhii Troshkin, Oleh Kulitsa, Serhii Pozdieiev, et al. Determination of heat transfer process in vertical cable tunnels of nuclear power plants under real fire conditions [J]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. № 5 (10). P. 34–42.
6. Семерак М. М., Домінік А. М., Мигаленко К. І., Руденко Д. В. Математичне моделювання та дослідження величини теплового потоку факела пожежі. *Вісник ЛДУБЖД* : збірник наук. праць. Львів : ЛДУ БЖД, 2013. № 7. С. 225–230.
7. Bo Li, Yangjin Shi, Shaohua Mao, Xiaoyang Ni, Kaihua Lu. Experimental investigation of the characteristics of flame geometry and heat transfer from wind-driven pool fires. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2024. Vol. 53. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102695>.
8. Xinjie Huang, Hailong Ding, Xinyi Zhang, Xinyi Li, Miaomiao Wang, Pengyuan Zhang. Effects of wind speed, spacing distance and heat release rate on the combustion and flame merging characteristics of two extra-thin line fires. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024. Vol. 60. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104676>.
9. Alankrit Srivastava, Saurav Kumar, Ajay V. Singh, Heat transfer in wind-driven fires stabilized under a mixed-convective turbulent flow environment. *Fire Safety Journal*. 2024. Vol. 142. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.104040>.
10. Ніжник В. В. Розвиток наукових основ оцінювання безпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти. Київ, 2020. 409 с.
11. A method of experimental studies of heat transfer processes between adjacent facilities / V. Nizhnyk, S. Shchipets, O. Tarasenko, V. Kropyvnytskyi, B. Medvid. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7. № 4.3. Special Issue 3. P. 288–292.

12. Семерак М. М., Поздєєв С. В., Яковчук Р. С., Чернецький В. В. Моделювання теплового впливу пожежі на резервуари із нафтопродуктами в резервуарних парках. *Пожежна безпека* : збірник наук. праць. Львів : ЛДУ БЖД, 2016. № 29. С. 125–135.

13. Ying Zhang, Wei Zhang, Yifan Lin, Yue Chen, Kaiyuan Li. Flame attachment effect on the distributions of flow, temperature and heat flux of inclined fire plume. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024. Vol. 174. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121313>.

14. Лазаренко О. В. Екранування теплового потоку радіальною водяною завісою, генерованою переносним водяним пожежним стволом багатопільового призначення. Львів, 2012. 171 с.

15. Гаврилко О. А., Білінський Б. О. Вплив водяних струменів віялового типу на тепловий захист під час пожеж. *Вісник національного університету «Львівська політехніка». Серія «Теорія і практика будівництва»*. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2017. № 877. С. 33–37.

16. Шаршанов А. Я., Абрамов Ю. О. Захист речовин і матеріалів від теплового впливу пожежі за допомогою екранів і покриттів. Харків : НУЦЗУ, 2023. 280 с.

17. Renkas A. A., Popovych V. V., Dominik A. A. Method for determining the optimal location of fire-fighting equipment for localization of ground forest fires. *Series of Geology and Technical Sciences*. 2021. Vol. 2, P. 144–150. DOI: 10.32014/2021.2518-170X.46.

18. Gavryliuk A., Yakovchuk R., Ballo Y., Rudyk Y. Thermal Modeling of the Electric Vehicle Fire Hazard Effects on Parking Building. *SAE Int. J. Trans. Safety*. 2023. № 11 (3). P. 421–434. <https://doi.org/10.4271/09-11-03-0013>.

19. Гаврилюк А. Ф., Гудим В. І., Назаровець О. Б. Дослідження режимів нагрівання провідників бортових електромереж автотранспортних засобів струмами короткого замикання. *Науковий вісник НЛТУ* : збірник наук. праць. Львів : РВВ НЛТУ України, 2015. № 25.4. С. 133–138.

20. Семерак М. М., Михайлишин М. Р. Вплив швидкості вітру на процеси теплообміну між вертикальними сталевими резервуарами (на прикладі пожежі на нафтобазі «БРСМ Нафта»). *Пожежна безпека* : збірник наук. праць. Львів : ЛДУ БЖД, 2017. № 30. С. 137–147.

References

1. Yide Yang, Xin Chen, Mali Gong, & Jianshe, Ma. (2024). Research on the division of heat dissipation spaces for multiple heat sources based on the adiabatic characteristic of heat flow lines *Applied Thermal Engineering*. Vol. 257, Part B. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124263>. [in English].

2. Qi, Deng, Hua, Chen, Changpeng, Yang, Xin,Zhao, & Wen-long, Cheng (2024). Study on transient heat transfer characteristics of heat flow under low frequency periodic thermal boundary conditions. *International Communications in Heat and Mass*

Transfer. Vol. 159, Part A. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108021>. [in English].

3. Kostenko, T. V. (2017). Prohnozuvannia teplovoho navantazhennia na riatuvalnykiv pid chas hasinnia pozhezh u rezervuarakh z naftoproduktamy [Forecast of thermal load on rescuers during the exhaustion of fire in tanks with petroleum products] *Pozhezhna bezpeka : zb. nauk. prats'.* L'viv : LDU BZhd. № 30. S. 91–98. [in Ukrainian]

4. Semerak, M. M., Dominik, A. M., Myhalenko, K. I. Rudenko, D. V. (2013). Teplovi potoky, zumovleni vyprominiuvanniam fakela pozhezhi [Mathematical modeling and research of quantities of jet fire heat flow]. *Visnyk LDU BZhd: zb. nauk. prats'.* L'viv : LDU BZhd. № 7. S. 225–230. [in Ukrainian]

5. Serhii, Troshkin, Oleh, Kulitsa, Serhii, Pozdieiev, et al. (2023). Determination of heat transfer process in vertical cable tunnels of nuclear power plants under real fire conditions [J]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (10): 34–42. [in English].

6. Semerak, M. M., Dominik, A. M., & Subota, A. B. (2011). Matematyчне modeliuвання ta doslidzhennia velychyny teplovoho potoku fakela pozhezhi [Thermal flows caused by fire fakel waves]. *Pozhezhna bezpeka : zb. nauk. prats'.* L'viv : LDU BZhd. № 19. S. 131–136. [in Ukrainian]

7. Bo, Li, Yangjin, Shi, Shaohua, Mao, Xiaoyang, Ni, & Kaihua, Lu (2024). Experimental investigation of the characteristics of flame geometry and heat transfer from wind-driven pool fires. *Thermal Science and Engineering Progress*. Vol. 53. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102695>. [in English].

8. Xinjie, Huang, Hailong, Ding, Xinyi, Zhang, Xinyi, Li, & Miaomiao Wang, Pengyuan Zhang (2024). Effects of wind speed, spacing distance and heat release rate on the combustion and flame merging characteristics of two extra-thin line fires Case Studies in Thermal Engineering. Vol. 60. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104676>. [in English].

9. Alankrit, Srivastava, Saurav, Kumar, Ajay, V. (2024). Singh, Heat transfer in wind-driven fires stabilized under a mixed-convective turbulent flow environment. *Fire Safety Journal*. Vol. 142. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.104040>. [in English].

10. Nizhnyk, V. V. (2020). Rozvytok naukovykh osnov otsiniuvannia nebezpeky poshyrennia pozhezhi na sumizhni budivelni obiekty [Rozvytok naukovykh osnov otsiniuvannia nebezpeky poshyrennia pozhezhi na sumizhni budivelni obiekty]. Kyiv. 409 s. [in Ukrainian]

11. Nizhnyk, V. A. (2018). Method of experimental studies of heat transfer processes between adjacent facilities / S. Shchipets, O. Tarasenko, V. Kropyvnytskyi, B. Medvid *International Journal of Engineering & Technology*; Vol. 7, № 4.3: Special Issue 3. 288–292. [in English].

12. Semerak, M. M. (2016). Modeliuвання teplovoho vplyvu pozhezhi na rezervuary iz naftoproduktamy v rezervuarnykh parkakh [Modeling of ther-

mal fire effect on tanks with oil products in the tank farms]. M. M. Semerak, S. V. Pozdeyev, R. S. Yakovchuk, V. V. Chernetskyi *Pozhezhna bezpeka : zb. nauk. prats. Lviv : LDU BZhD. № 29. S. 125–135.* [in Ukrainian]

13. Ying, Zhang, Wei, Zhang, Yifan, Lin, Yue, Chen, & Kaiyuan, Li (2024). Flame attachment effect on the distributions of flow, temperature and heat flux of inclined fire plume *International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 174.* <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121313>. [in English].

14. Lazarenko, O. V. (2012). Ekranuvannia teplovoho potoku radialnoiu vodianoiu zavisoiu, henerovanoiu perenosnym vodianym pozhezhnym stolom bahatotsilovoho pryznachennia [Shielding of the heat flow by a radial water curtain generated by a multi-purpose portable water fire barrel]. Lviv. 171 s. [in Ukrainian]

15. Havrylko, O., & B. Bilinsky (2017). Vplyv vodi- anykh strumeniv viialovoho typu na teplovyi zakhyst pid chas pozhezh [Influence of water type water torques on fire fight protection]. *Visnyk natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnik». Serie: Teoriia i praktyka budivnytstva. Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniky, No 877. P. 33–37.* [in Ukrainian]

16. Sharshanov, A.Ia., & Abramov, Yu.O. (2023). Zakhyst rehovyn i materialiv vid teplovoho vplyvu pozhezhi za dopomohoiu ekraniv i pokryttiv [Protection of substances and materials from the thermal

effects of fire using screens and coatings]. Kharkiv: NUTsZU, 280 s. [in Ukrainian]

17. Renkas, A.A., Popovych, V.V., & Dominik, A.A. (2021). Method for determining the optimal location of firefighting equipment for localization of ground forest fires. *Series of Geology and Technical Sciences, vol. 2, pp. 144–150.* DOI: 10.32014/2021.2518-170X.46. [in English].

18. Gavryliuk, A., Yakovchuk, R., Ballo, Y., & Rudyk, Y. (2023). «Thermal Modeling of the Electric Vehicle Fire Hazard Effects on Parking Building», *SAE Int. J. Trans. Safety* 11(3):421–434, <https://doi.org/10.4271/09-11-03-0013>. [in English].

19. Havryliuk, A. F. (2015). Doslidzhennia rezhymiv nahrivannia providnykh bortovykh elektromerezh avtotransportnykh zasobiv strumamy korotkoho замыкання [Study of modes of heating of conductors of on-board electrical networks of motor vehicles by short-circuit currents]. *Naukovyi Visnyk NLTU: Zb. nauk. Prats. L.: RVV NLTU Ukrainy, № 25.4 S. 133–138.* [in Ukrainian]

20. Semerak, M. M. (2017). Vplyv shvydkosti vitru na protsesy teploobminu mizh vertykalnymi stalevymy rezervuaramy (na prykladi pozhezhi na naftobazi «BRSM Nafta») [Influence of the wind velocity on the processes of heat transfer between vertical steel tanks (in the context of fire on the tank farm «BRSM NAFTA»)] *Pozhezhna bezpeka : zb. nauk. prats'. Lviv : LDU BZhD, № 30. S. 137–147.* [in Ukrainian]

© А. М. Домінік, Ю. М. Нагірняк, Д. В. Фреюк, 2024.

Оглядова стаття.

Надійшла до редакції 09.12.2024.

Прийнято до публікації 18.12.2024.