

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СЕРЕДА ДМИТРО ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 614.841.334.1

ДИСЕРТАЦІЯ

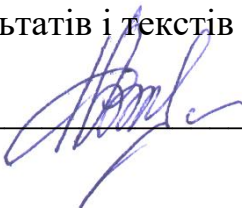
**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ НЕБЕЗПЕКИ
ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ВІД ВІТРОВИХ
ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК**

261 – пожежна безпека

26 – цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.


_____ Дмитро СЕРЕДА

Науковий керівник:

Балло Ярослав В'ячеславович, доктор технічних наук, старший дослідник

Черкаси – 2026

АНОТАЦІЯ

Середа Д.В. Удосконалення методу оцінювання небезпеки поширення пожежі від вітрових електроустановок. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 «Пожежна безпека». – Національний університет цивільного захисту України Державної служби України з надзвичайних ситуацій, Черкаси, 2026.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-технічного завдання у сфері пожежної безпеки – розкриттю закономірностей впливу параметрів вітрових електроустановок на прогнозування можливості поширення пожеж від даного об'єкту на суміжний, як наукове підґрунтя удосконалення розрахункового методу визначення протипожежних відстаней.

У вступі сформульовано ідею роботи, обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету, наукові задачі, об'єкт та предмет досліджень. Виявлено недосконалість в існуючому методі визначення безпечної протипожежної відстані між суміжними об'єктами із використанням рівняння променистого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності, що не враховує можливість аварійного сценарію, що супроводжується руйнуванням конструкції споруди, вітрових електроустановок, за сценарієм «руйнування-пожежа» або «пожежа-руйнування». Здійснено обґрунтування новизни роботи та приведено практичне значення отриманих результатів, представлено загальну характеристику дослідження. Приведено особистий внесок здобувача, наведено дані про апробацію досліджень, публікації, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі проведено аналіз пожеж, статистичні дані щодо їх масштабів, що супроводжувалися аварійним падінням вітрової електроустановки з послідуєчим виливом та займанням оливи та поширенням вогню на суміжні об'єкти інфраструктури. Проведено систематизацію причин пожежонебезпечних ситуацій на вітрових електроустановках. Проаналізовано типи вітрових електроустановок та систематизовано їх за кількістю пожежної навантаги.

Здійснено аналіз вимог нормативно правових актів в частині забезпечення обмеження поширення пожежі від вітрових електроустановок.

На основі виявлених недоліків, встановлено можливість підвищення ефективності запобігання поширення пожежі від вітрової електроустановки шляхом застосування більш якісного підходу до вибору вихідних даних для розрахунку протипожежної відстані із використанням рівняння променистого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності від вітрової електроустановки до суміжних об'єктів. Результати проведеного аналізу літературних джерел та нормативних документів дали можливість сформулювати мету роботи й перелік завдань для її досягнення.

У другому розділі досліджено теоретичні основи моделювання процесів горіння палива на горизонтальних поверхнях та досліджено супутні тепломасообмінні явища. На основі узагальнення відомих моделей теплового випромінювання (Modak, Heskestad, Mudan, Beyler, Dayan і Tien) сформульовано систему математичних залежностей, що описують процеси утворення енергії випромінювання пожежі для некруглих басейнів. Визначено аналітичні співвідношення для оцінювання висоти полум'я, коефіцієнтів випромінювання, пропускання та розсіювання тепла в атмосфері з урахуванням фізико-хімічних характеристик палива, його форми та типу. Здійснено обґрунтування математичних підходів до моделювання пожежі класу В на поверхні ґрунту, що враховують теплофізичні властивості середовища, зокрема пористість, проникність, теплоємність і теплопровідність різних типів ґрунтів, а також параметри вуглеводневого палива. Проаналізовано вплив температури, вологості, складу ґрунту, вітрових навантажень і турбулентності на процеси розвитку пожежі. Досліджено математичну модель поширення полум'я на топографічно нерівній поверхні на основі методу Лагранжа, яка враховує геодезичну та нормальну кривизни, що визначають просторову еволюцію фронту пожежі. Модель дозволяє кількісно описати взаємодію геометрії рельєфу, властивостей палива та зовнішніх факторів, забезпечуючи точність відтворення реального периметра пожежі в межах 10%. Розроблено спрощену математичну модель

оцінки небезпеки поширення пожежі з врахуванням аварійного сценарію «руйнування–пожежа» / «пожежа–руйнування» для вітрових електроустановок. Представлені результати створюють теоретичне підґрунтя для подальших експериментальних і чисельних досліджень закономірностей поширення вогню на відкритих ділянках із різними фізико-геометричними характеристиками.

У третьому розділі описано методологію проведення натурних експериментальних вогневих досліджень поширення пожежі від вітрової електроустановки. Систематизовано основні вимоги щодо засобів вимірювальної техніки та основних компонентів досліджень, які застосовуються під час проведення вогневих випробувань. Обґрунтовано основні критерії, які характеризують небезпеку поширення пожежі на суміжні об'єкти, а також їх граничні значення, що дозволить більш точно спрогнозувати потенційні пожежонебезпечні наслідки від аварійної ситуації. Обґрунтовано параметри вогневої площадки та компонентів імітаційної моделі вітрової електроустановки. Визначено порядок проведення експериментальних вогневих досліджень щодо поширення пожежі від вітрової електроустановки до суміжних об'єктів.

За результатом проведеної серії експериментальних вогневих досліджень з використанням імітаційної моделі вітрової електроустановки потужністю до 2 кВт та кількістю оливи в корпусі ротора до 20 л визначено, що площа пожежі, яка характеризується сталим температурним режимом в межах 500-600 °С становить від 12 м² до 7 м² тривалістю горіння до 11 хвилин.

Виокремлено дві фази горіння розливу оливи, а саме перша фаза горіння, тривалістю близько 2 хвилин, характеризувалася появою окремих локальних осередків вогню, які швидко вигорали та призводили до поступового зменшення площі пожежі, друга фаза – тривала до 10 хвилини та відзначалася формуванням стійкого основного осередку горіння, зосередженого в зоні падіння гондоли вітрової електроустановки.

Найбільш небезпечною фазою горіння є проміжок часу з 2-ої по 10-ту хвилину, при цьому максимальна відстань від місця встановлення опори імітаційної моделі вітрової електроустановки, висота якої становила 10 м, до

найвіддаленішої зони ураженої вогнем ділянки вогневого майданчику становила 15,6 м, що фактично на 56% перевищує фактичні геометричні розміри висоти вітрової електроустановки.

Проведені натурні вогневі дослідження розвитку пожежі під час аварійного падіння вітрової електроустановки дозволили створити підґрунтя для удосконалення розрахункового методу оцінювання протипожежних відстаней із використанням рівняння променистого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності.

У четвертому розділі за допомогою обчислювальної газо-гідродинаміки досліджено процеси поширення пожежі від вітрової електроустановки. Сформовано програми досліджень поширення пожежі від вітрових електроустановок для визначених типів потужністю від 30 кВт до 9,5 МВт. Із використанням розробленої обчислювальної газо-гідродинамічної моделі, яка відтворює сценарій розвитку пожежі після руйнування гондоли з виливанням оливи та подальшим займанням, поетапно змодельовано процеси поширення пожежі за сценарієм «руйнування-пожежа». Отримані результати дозволили оцінити тепловий вплив полум'я на суміжні об'єкти, площу можливого розливу оливи та визначити критичні відстані безпечного розміщення вітрових установок. Сформовано пропозиції, щодо удосконалення розрахункового методу визначення протипожежних відстаней для вітрових електроустановок. В основі удосконаленої методики закладено принцип додаткового врахування уточнюючих емпіричних коефіцієнтів, що враховують висоту вітрової електроустановки R_1 та радіус площі розливу оливи R_2 . На прикладі реального об'єкту вітрової електроустановки, проведено розрахунок економічного ефекту від застосування удосконаленого методу оцінювання небезпеки поширення пожежі від вітрових електроустановок на суміжні об'єкти.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в одержанні нових науково обґрунтованих результатів, які в сукупності забезпечують удосконалення методу прогнозування небезпеки поширення пожежі на суміжні об'єкти від вітрових електроустановок з урахуванням їх конструктивних параметрів та аварійних

сценаріїв, при цьому розвинено експериментальний метод визначення параметрів утворення зони пожежі та теплообміну з використанням імітаційного зразка об'єкта.

1. Вперше розроблено математичну модель визначення безпечної протипожежної відстані для вітрових електроустановок, яка відрізняється від існуючих урахуванням сценарію «руйнування – пожежа» та впливу вітрового навантаження на поширення теплового поля пожежі, що дало змогу встановити перевищення радіуса зони температур для суміжних об'єктів понад 250 °С над радіусом розливу оливи до 45 % за швидкості вітру понад 10 м/с та забезпечити підвищення точності визначення безпечних протипожежних відстаней для об'єктів вітроенергетики.

2. Вперше встановлено закономірність формування зони пожежі під час аварійного падіння та розгерметизації оливомісного корпусу вітрової електроустановки, яка на відміну від існуючих підходів, враховує сукупний вплив конструктивних параметрів установки та вітрового навантаження на геометричні характеристики зони пожежі, що дало змогу встановити перевищення відстані до найбільш віддаленого краю зони пожежі над геометричною висотою опори до 56 % та підвищити достовірність оцінювання небезпеки поширення пожежі.

3. Удосконалено метод оцінювання небезпеки поширення пожежі від вітрової електроустановки, відмінністю якого є врахування фактичних конструктивних параметрів об'єкта, кількості пожежної навантаги та найбільш несприятливих умов розвитку пожежонебезпечної ситуації, зокрема аварійних сценаріїв «руйнування – пожежа» та «пожежа – руйнування», що дало змогу підвищити точність визначення безпечних протипожежних відстаней для вітрових електроустановок в умовах аварійного розвитку пожежі.

4. Набула подальшого розвитку методика експериментального визначення параметрів теплообміну під час пожежі у відкритому просторі, яка, на відміну від існуючих, передбачає використання імітаційного зразка об'єкта, що піддається впливу найбільш несприятливих умов розвитку пожежонебезпечної ситуації.

Ключові слова: пожежна безпека, протипожежні відстані, запобігання поширення пожежі, вітрові електроустановки, комп'ютерне моделювання поширення пожежі.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. **Середа Д.В.**, Балло Я.В. (2024). Удосконалення розрахункового методу визначення протипожежних відстаней для вітрових електроустановок. Пожежна безпека, 45, 71-80. <https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.09>.

Особистий внесок – проаналізовано існуючі методи оцінки безпечних протипожежних відстаней та сформульовано задачі досліджень.

2. **Середа Д.В.**, Балло Я.В. (2025). Методика дослідження поширення пожежі від вітрової електроустановки до суміжних об'єктів. Комунальне господарство міст. Серія: «Інформаційні технології та інженерія», 1(189), 377-383. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-377-383>.

Особистий внесок – розроблено методику досліджень поширення пожежі в разі аварій на вітровій електроустановці, обґрунтовано критерії оцінювання, методологію проведення досліджень, а також засоби виміральної техніки.

3. **Середа Д.В.**, Балло Я.В. (2025). Результати натурних вогневих досліджень розвитку пожежі під час аварійного падіння вітрової електроустановки. Комунальне господарство міст. Серія: «Інформаційні технології та інженерія», 4(192), 343-349. <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-4-192-343-349>.

Особистий внесок – наведено систематизовані результати натурних вогневих досліджень під час імітації аварійної ситуації падіння вітрової електроустановки та її подальшого займання.

4. Борисова А.С., Ніжник В.В., **Середа Д.В.** (2020) Експериментальні дослідження поверхневої густини теплового потоку в умовах вітрового впливу. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. К.: № 1 (9), С. 107-115. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2020.1.107-115>.

Особистий внесок – узагальнено результати натурних вогневих досліджень та сформульовано висновки на основі отриманих залежностей.

5. Климась Р.В., Ніжник В.В., Нікулін О.Ф., Крикун О.М., **Середа Д.В.**, Цимбалістий С.З. (2021) Експериментальні дослідження встановлення

закономірності зниження температури та припинення горіння трансформаторного масла залежно від параметрів гравійної засипки маслоприймача. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. К.: № 2 (12), С. 101-111. [https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2\(12\).101-110](https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2(12).101-110).

Особистий внесок – обґрунтовано методологічні аспекти проведення натурних вогневих досліджень та систематизовано отримані експериментальні дані.

6. Климась Р.В., Ніжник В.В., Несенюк Л.П., **Середа Д.В.** (2023) До питань економічного ефекту під час впровадження методу прогнозування припинення та поширення горіння системою вогнеперешкоджання на масло наповнених трансформаторних підстанціях. Науковий журнал: Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. К.: Том 34 (73), № 3, С. 52-57. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/09>.

Особистий внесок – обґрунтовано ключові чинники, які впливають на показники економічної доцільності впровадження удосконаленої системи вогнеперешкоджання.

7. Балло Я.В., Коваль Р.Р., **Середа Д.В.**, Несенюк Л.П. (2026) Дослідження процесів поширення пожежі від вітрової електроустановки за допомогою обчислювальної газо-гідродинаміки. Комунальне господарство міст. Серія: «Інформаційні технології та інженерія», 1(196), 277-289. <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2026-1-196-277-289>.

Особистий внесок – обґрунтовано критеріальні умови, сценарій розвитку пожежі, а також розроблено газо-гідродинамічну модель вітрових електроустановок та середовища досліджень.

Публікації, які засвідчують апробацію дисертації

8. **Середа Д.В.**, Балло Я.В. Аналіз пожежної небезпеки вітроелектростанцій. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: Зб. наук. праць XVII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів.* Львів: ЛДУБЖД, 2022. С. 31-34.

Особистий внесок – досліджено основні причини виникнення пожеж на вітрових електроустановках.

9. Y.V. Ballo, A.V. Mykhailova, **D.V. Sereda**, I.G. Stylyk, O.O. Sizikov Assessment of the possible impact of wind generator fire on the environment. XVI International Scientific Conference «*Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*». Kyiv, 2022. Eage <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580021>

Особистий внесок – здійснено оцінку потенційних небезпек під час аварій, що супроводжуються пожежами на вітрових електроустановках.

10. **Середа Д.В.**, Балло Я.В. Аналіз моделі аварійного розтікання мастила від вітроелектроустановки. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності*: Зб. наук. праць XVIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів. Львів: ЛДУ БЖД, 2023. С. 78-81.

Особистий внесок – представлено основні чинники, які впливають на формування моделі аварійного розтікання мастила.

11. **Середа Д.В.**, Балло Я.В. До питання процесів теплообміну між факелом пожежі електроустановки та суміжними об'єктами. *Problems of Emergency Situations*: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2023. С. 145-146.

Особистий внесок – наведено результати досліджень, щодо особливостей протікання процесів теплопередачі під час аварій нестационарного характеру.

12. **Середа Д.В.**, Балло Я. В. До питань удосконалення розрахункового методу визначення протипожежних відстаней для вітрових електроустановок. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності*: Зб. наук. праць XIX Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів. Львів: ЛДУ БЖД, 2024. С. 151-154.

Особистий внесок – представлено удосконалену математичну модель, яка дозволяє більш точно оцінити безпечні протипожежні відстані.

13. Балло Я.В., Серета Д.В. Експериментальні дослідження поширення пожежі від вітрових електроустановок до суміжних об'єктів. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції*, Львів: ЛДУ БЖД, 2024. С. 61-63.

Особистий внесок – узагальнено результати експериментальних досліджень щодо оцінки безпечних протипожежних відстаней.

SUMMARY

Sereda D.V. Improving the method of assessing the risk of fire spread from wind power plants. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

The dissertation is submitted for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 261 – Fire Safety. – National University of Civil Protection of Ukraine of the State Emergency Service of Ukraine, Cherkasy, 2026.

The dissertation is dedicated to solving a relevant scientific and technical problem in the field of fire safety - revealing the patterns of influence of wind power plant parameters on predicting the possibility of fire spreading from a given object to an adjacent one, as a scientific basis for improving the calculation method for determining fire-fighting distances.

The introduction formulates the idea of the work, justifies the relevance of the chosen topic, formulates the goal, scientific tasks, object and subject of research. Imperfections are identified in the existing method of determining the safe fire distance between adjacent objects using the equation of radiant heat transfer and the equation of non-stationary heat conductivity, which does not take into account the possibility of an emergency scenario accompanied by the destruction of the structure of the building, wind power plants, according to the scenario "destruction-fire" or "fire-destruction". The novelty of the work is substantiated and the practical significance of the results obtained is given, a general characteristic of the research is presented. The personal contribution of the applicant is given, data on the testing of research, publications, structure and scope of work are provided.

The first section analyzes fires and provides statistical data on their scale, which were accompanied by an emergency fall of a wind turbine with subsequent oil spillage and ignition and the spread of fire to adjacent infrastructure facilities. The causes of fire hazards at wind turbines are systematized. Types of wind turbines are analyzed and systematized by the amount of fire load. The requirements of regulatory legal acts are analyzed in terms of ensuring the limitation of the spread of fire from wind turbines.

Based on the identified shortcomings, it was established that it is possible to increase the effectiveness of preventing the spread of fire from a wind power plant by applying a better approach to the selection of input data for calculating the fire-fighting distance using the equation of radiant heat transfer and the equation of non-stationary heat conduction from the wind power plant to adjacent objects. The results of the analysis of literary sources and regulatory documents made it possible to formulate the goal of the work and a list of tasks for its achievement.

The second section investigates the theoretical foundations of modeling fuel combustion processes on horizontal surfaces and investigates the associated heat and mass transfer phenomena. Based on the generalization of known thermal radiation models (Modak, Heskestad, Mudan, Beyler, Dayan and Tien), a system of mathematical dependencies is formulated that describe the processes of fire radiation energy formation for non-circular basins. Analytical relations are determined for estimating the flame height, radiation coefficients, transmission and heat dissipation in the atmosphere, taking into account the physicochemical characteristics of the fuel, its shape and type. Mathematical approaches to modeling class B fires on the soil surface are substantiated, which take into account the thermophysical properties of the environment, in particular porosity, permeability, heat capacity and thermal conductivity of different types of soils, as well as hydrocarbon fuel parameters. The influence of temperature, humidity, soil composition, wind loads and turbulence on the fire development processes is analyzed. A mathematical model of flame spread on a topographically uneven surface based on the Lagrangian method has been investigated, which takes into account geodesic and normal curvatures that determine the spatial evolution of the fire front. The model allows quantitatively describing the interaction of the terrain geometry, fuel properties and

external factors, ensuring the accuracy of reproducing the real fire perimeter within 10 %. A simplified mathematical model for assessing the risk of fire spread has been developed, taking into account the emergency scenario "destruction-fire" / "fire-destruction" for wind power plants. The presented results create a theoretical basis for further experimental and numerical studies of the patterns of fire spread in open areas with different physical and geometric characteristics.

The third section describes the methodology for conducting full-scale experimental fire studies of fire spread from a wind turbine. The main requirements for measuring equipment and the main components of the studies used during fire tests are systematized. The main criteria that characterize the risk of fire spread to adjacent objects, as well as their limit values, are substantiated, which will allow more accurately predicting potential fire-hazardous consequences of an emergency situation. The parameters of the fire site and components of the simulation model of a wind turbine are substantiated. The procedure for conducting experimental fire studies of fire spread from a wind turbine to adjacent objects is determined.

According to the results of a series of experimental fire studies using a simulation model of a wind power plant with a capacity of up to 2 kW and an amount of oil in the rotor housing of up to 20 liters, it was determined that the area of the fire, which is characterized by a constant temperature regime within 500-600 °C, is from 12 m² to 7 m² with a burning duration of up to 11 minutes.

Two phases of the oil spill combustion were distinguished, namely the first phase of combustion, lasting about 2 minutes, was characterized by the appearance of individual local fire centers, which quickly burned out and led to a gradual reduction in the fire area, the second phase lasted up to 10 minutes and was marked by the formation of a stable main combustion center concentrated in the area of the fall of the wind turbine nacelle.

The most dangerous phase of the fire is the time period from the 2nd to the 10th minute, while the maximum distance from the installation location of the support of the simulated model of the wind power plant, the height of which was 10 m, to the most remote area of the fire-affected area of the fire site was 15.6 m, which is actually 56 % greater than the actual geometric dimensions of the height of the wind power plant.

The conducted field fire studies of fire development during the emergency collapse of a wind turbine allowed creating a basis for improving the calculation method for assessing fire-fighting distances using the equation of radiant heat transfer and the equation of non-stationary heat conductivity.

In the fourth section, the processes of fire spread from a wind turbine are investigated using computational gas-hydrodynamics. Research programs for the spread of fire from wind turbines for certain types with a capacity of 30 kW to 9.5 MW have been formed. Using the developed computational gas-hydrodynamic model, which reproduces the scenario of fire development after the destruction of the nacelle with oil spillage and subsequent ignition, the processes of fire spread according to the “destruction-fire” scenario have been gradually modeled. The results obtained allowed us to assess the thermal impact of the flame on adjacent objects, the area of possible oil spillage and determine the critical distances for the safe placement of wind turbines. Proposals have been formed to improve the calculation method for determining fire-prevention distances for wind turbines. The improved methodology is based on the principle of additional consideration of clarifying empirical coefficients that take into account the height of the wind power plant R_1 and the radius of the oil spill area R_2 . Using the example of a real wind power plant, the economic effect of applying the improved method for assessing the risk of fire spreading from wind power plants to adjacent facilities was calculated.

The scientific novelty of the dissertation work lies in obtaining new scientifically substantiated results, which together provide an improvement in the method of predicting the risk of fire spreading to adjacent objects from wind power plants, taking into account their design parameters and emergency scenarios, while an experimental method for determining the parameters of fire zone formation and heat exchange using a simulated sample of the object has been developed.

1. For the first time, a mathematical model for determining the safe fire distance for wind power plants has been developed, which differs from existing ones by taking into account the “destruction - fire” scenario and the influence of wind load on the spread of the thermal field, which made it possible to establish the excess of the radius of the

temperature zone over 250 ° C over the radius of oil spillage by up to 45% at wind speeds of over 10 m/s and to ensure an increase in the accuracy of determining safe fire distances for wind power facilities.

2. For the first time, the regularity of the formation of the fire zone during an emergency fall and depressurization of the oil-containing housing of a wind power plant has been established, which, unlike existing approaches, takes into account the cumulative effect of the design parameters of the plant and wind load on the geometric characteristics of the fire zone, which made it possible to establish the excess of the distance to the most remote edge of the fire zone over the geometric height of the support by up to 56% and increase the reliability of assessing the risk of fire spread.

3. The method for assessing the risk of fire spread from a wind power plant has been improved, the difference of which is that it takes into account the actual design parameters of the facility, the amount of fire load and the most adverse conditions for the development of a fire-hazardous situation, in particular the emergency scenarios "destruction - fire" and "fire - destruction", which made it possible to increase the accuracy of determining safe fire-prevention distances for wind power plants in conditions of emergency fire development.

4. The methodology for experimentally determining heat transfer parameters during a fire in an open space has been further developed, which, unlike existing ones, involves the use of a simulated sample of the facility that is exposed to the most adverse conditions for the development of a fire-hazardous situation.

Keywords: fire safety, fire protection distances, fire spread prevention, wind power plants, computer simulation of fire spread.

LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE THEME OF THE DISSERTATION

Articles in scientific and professional publications of Ukraine

1. **Sereda D.V.**, Ballo Ya.V. (2024). Improvement of the calculation method for determining fire distances for wind power plants. *Fire Safety*, 45, 71-80. <https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.09>.

Personal contribution – the existing methods for assessing safe fire distances were analyzed and research tasks were formulated.

2. **Sereda D.V.**, Ballo Ya.V. (2025). Methodology for studying the spread of fire from a wind power plant to adjacent objects. *Municipal Utilities. Series: "Information Technologies and Engineering"*, 1(189), 377-383. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-377-383>.

Personal contribution – the methodology for studying the spread of fire in the event of accidents at a wind turbine was developed, the evaluation criteria, research methodology, and measuring equipment were substantiated.

3. **Sereda D.V.**, Ballo Ya.V. (2025). Results of field fire studies of fire development during an emergency collapse of a wind turbine. *Municipal Utilities. Series: "Information Technologies and Engineering"*, 4(192), 343-349. <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-4-192-343-349>.

Personal contribution – the systematized results of field fire studies during the simulation of an emergency situation of a wind turbine collapse and its subsequent ignition were presented.

4. Borisova A.S., Nizhnyk V.V., **Sereda D.V.** (2020) Experimental studies of surface heat flux density under wind conditions. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*. K.: №. 1 (9), pp. 107-115. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2020.1.107-115>.

Personal contribution – the results of field fire studies were summarized and conclusions were formulated based on the obtained dependencies.

5. Klymas R.V., Nizhnyk V.V., Nikulin O.F., Krykun O.M., **Sereda D.V.**, Tsymbalysty S.Z. (2021) Experimental studies of establishing the regularity of temperature decrease and cessation of combustion of transformer oil depending on the parameters of gravel backfilling of the oil receiver. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*. K.: №. 2 (12), P. 101-111. [https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2\(12\).101-110](https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2(12).101-110).

Personal contribution – the methodological aspects of conducting field fire studies were substantiated and the experimental data obtained were systematized.

6. Klymas R.V., Nizhnyk V.V., Nesenyuk L.P., **Sereda D.V.** (2023) On the issues of economic effect when implementing the method of predicting the cessation and spread of combustion by the fire suppression system in oil-filled transformer substations. *Scientific journal: Scientific notes of the V.I. Vernadsky Tavrichesky National University. Series: Technical Sciences.* K.: Vol. 34 (73), №. 3, pp. 52-57. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/09>.

Personal contribution – the key factors that influence the indicators of the economic feasibility of implementing an improved fire prevention system were substantiated.

7. Ballo Ya.V., Koval R.R., **Sereda D.V.**, Nesenyuk L.P. (2026) Research of fire spread processes from a wind power plant using computational gas-hydrodynamics. *Municipal utilities. Series: "Information technologies and engineering"*, 1(196), 277-289. <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2026-1-196-277-289>.

Personal contribution – the criteria conditions, the fire development scenario were substantiated, and a gas-hydrodynamic model of wind power plants and the research environment was developed.

Materials of scientific and practical conferences certifying the approval of the dissertation:

8. **Sereda, D. V.**, Ballo, Y. V. Analysis of the fire hazard of wind power plants. *Problems and prospects of life safety system development: Collection of scientific papers of the XVI International scientific and practical conference of young scientists, cadets and students.* Lviv: LDU BZH, 2022. P. 31-34.

Personal contribution – the main causes of fires in wind power plants are investigated.

9. Y.V. Ballo, A.V. Mykhailova, **D.V. Sereda**, I.G. Stylyk, O.O. Sizikov. Assessment of the possible impact of wind generator fire on the environment. *XVI International scientific conference "Monitoring of geological processes and ecological condition of the environment"*. Kyiv, 2022. Eage. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580021>

Personal contribution – potential hazards during accidents accompanied by fires in wind power plants are assessed.

10. **Sereda, D. V.**, Ballo, Y. V. Analysis of the model of accidental oil spillage from a wind power plant. *Problems and prospects of life safety system development: Collection of scientific papers of the XVIII International scientific and practical conference of young scientists, cadets and students*. Lviv: LDU BZH, 2023. P. 78-81.

Personal contribution – the main factors that influence the formation of the model of emergency lubricant spillage are presented.

11. **Sereda, D. V.**, Ballo, Y. V. On the issue of heat exchange processes between the fire plume of a power plant and adjacent objects. *Problems of emergency situations: Materials of the International scientific and practical conference*. Kharkiv: National University of Civil Protection of Ukraine, 2023. P. 145-146.

Personal contribution – the results of research on the features of heat transfer processes during non-stationary accidents are presented.

12. **Sereda, D. V.**, Ballo, Y. V. On the issues of improving the calculation method for determining fire safety distances for wind power plants. *Problems and prospects of life safety system development: Collection of scientific papers of the XIX International scientific and practical conference of young scientists, cadets and students*. Lviv: LDU BZH, 2024. P. 151-154.

Personal contribution – an improved mathematical model is presented, which allows for a more accurate assessment of safe fire distances.

13. Ballo, Y. V., **Sereda D. V.** Experimental studies of the spread of fire from wind power plants to adjacent objects. *Current issues of fire safety and prevention of emergencies in modern conditions: collection of abstracts of the International scientific and practical conference*. Lviv: LDU BZH, 2024. P. 61-63.

Personal contribution – summarizes the results of experimental studies on the assessment of safe fire distances.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПОЖЕЖ НА ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАХ.....	27
1.1. Аналіз сучасного стану пожеж на вітрових електроустановках	27
1.2. Систематизація причин пожежонебезпечних ситуацій на вітрових електроустановках.....	30
1.3. Аналіз та систематизація за типами та пожежною небезпекою вітрових електроустановок.....	36
1.4 Вимоги нормативно-правових актів в частині забезпечення обмеження поширення пожежі від вітрових електроустановок.....	43
Висновки до розділу I.....	49
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ МОДЕЛІ ГОРІННЯ ПАЛИВА НА ГОРИЗОНТАЛІЙ ПОВЕРХНІ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СУПУТНІХ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ.....	52
2.1. Математичні залежності, що описують енергію випромінювання пожежі для некруглих басейнів.....	52
2.2 Математичні підходи під час моделювання пожежі класу В на поверхні ґрунту.....	61
2.3 Розробка спрощеної математичної моделі розвитку пожежі за сценарієм «руйнування–пожежа» для вітрових електроустановок	65
Висновки до розділу II.....	75
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМИ-МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ВІД ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК ТА ПРОВЕДЕННЯ НАТУРНИХ ВОГНЕВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	77
3.1 Формування програми-методики досліджень поширення пожежі між об'єктами в результаті аварійної ситуації.....	77

3.2 Проведення натурних вогневих досліджень розвитку пожежі за сценарієм «руйнування-пожежа» вітрової електроустановки	87
Висновки до розділу III.....	94
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ВІД ВІТРОВОЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВКИ ЗА ДОПОМОГОЮ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ГАЗО-ГІДРОДИНАМІКИ	95
4.1 Формування програми досліджень поширення пожежі від вітрових електроустановок визначених типів.....	95
4.2 Розробка обчислюваної газо-гідродинамічної моделі для моделювання процесів поширення пожежі за сценарієм «руйнування-пожежа».....	100
4.3 Результати експериментальних досліджень щодо оцінювання впливу пожежі від визначених типів вітрових електроустановок та їх узагальнення.....	103
4.4 Удосконалення методу оцінювання небезпеки поширення пожежі від вітрових електроустановок.....	115
4.5. Оцінка економічного ефекту на прикладі об'єкту будівництва... Висновки за розділом IV.....	119 125
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	127
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	119
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	141
ДОДАТОК Б Акти впровадження результатів дисертації.....	145

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження зумовлене високою актуальністю проблеми підвищення пожежної безпеки під час влаштування вітрових електроустановок відносно суміжних об'єктів. Пожежна небезпека вітрових електроустановок є специфічною, оскільки вони містять значну кількість пожежного навантаження у вигляді оливи на висоті, що створює ризик швидкого розвитку пожежі та її поширення на інфраструктуру. Найбільш небезпечний сценарій передбачає падіння ВЕУ, вилив оливи з гондоли та утворення великої площі горіння, що значно підвищує тепловий вплив на сусідні об'єкти. Наразі в Україні відсутні єдині науково обґрунтовані підходи для встановлення протипожежних відстаней від вітрових електроустановок, а чинний нормативний документ не враховує аварійні сценарії «руйнування-пожежа». Існуючі наукові дослідження не стосувалися процесів оцінювання поширення пожежі саме для вітрових електроустановок з урахуванням їхніх конструктивних особливостей. Таким чином, метою роботи є підвищення точності розрахункових методів оцінювання небезпеки поширення пожежі від вітрових електроустановок, що стане науковим підґрунтям для встановлення безпечних протипожежних відстаней. Це буде реалізовано через удосконалення розрахункового методу, який використовує рівняння променистого теплообміну та нестационарної теплопровідності, враховуючи найбільш небезпечні сценарії аварій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційну роботу виконано відповідно до пріоритетних напрямів державної політики у сфері пожежної безпеки, цивільного захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій, а також у контексті реалізації основних напрямів розвитку наукової та науково-технічної діяльності у галузі безпеки об'єктів будівництва. Тематика дослідження відповідає сучасним науково-практичним завданням щодо зниження ризиків поширення пожежі між об'єктами та технологічними спорудами в енергетичній та цивільних галузях та відповідає основним завданням Стратегії розвитку системи технічного регулювання на

період до 2025 року затвердженої Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 17.11.2020 № 443.

Отримані результати є логічним продовженням та подальшим розвитком наукових досліджень, що виконувалися в межах галузевих і відомчих науково-дослідних програм, спрямованих на вдосконалення методичного забезпечення визначення безпечних протипожежних відстаней між будівлями, спорудами та іншими об'єктами захисту. Зазначені дослідження були орієнтовані на підвищення достовірності оцінювання ризику поширення пожежі між об'єктами, удосконалення підходів до прогнозування теплового впливу небезпечних чинників пожежі, а також обґрунтування вимог пожежної безпеки під час проектування, будівництва та експлуатації об'єктів різного функціонального призначення.

Ідея роботи полягає у розкритті закономірностей впливу конструктивних параметрів вітрових електростанцій на процеси поширення пожежі та прогнозування можливості поширення пожеж від даного об'єкту на суміжний.

Метою роботи є удосконалення розрахункового методу оцінювання безпеки поширення пожежі від вітрових електроустановок на суміжні об'єкти як наукове підґрунтя для встановлення безпечних протипожежних відстаней.

Завдання дослідження:

1. Провести аналіз пожеж на вітрових електроустановках, що супроводжувалися поширенням вогню, зокрема на суміжні об'єкти, найбільш небезпечні аварійні ситуації та визначити недоліки наявних методів оцінювання безпеки поширення пожежі від вітрових електроустановок на суміжні об'єкти.

2. Розробити математичну модель, яка дозволяє врахувати визначені пожежонебезпечні сценарії поширення пожежі на суміжні об'єкти та дослідити умови, які характеризують небезпеку поширення пожежі для такого типу споруд.

3. Розробити програму-методику натурних вогневих експериментальних досліджень розвитку пожежі під час аварійного падіння вітрової електроустановки, дослідити найбільш небезпечні фази горіння та систематизувати виявлені залежності.

4. Провести комп'ютерне моделювання процесів розвитку та поширення пожежі на суміжні об'єкти у разі падіння вітрової електроустановки, що супроводжується аварійним виливом оливи, з метою встановлення закономірностей теплового впливу за визначеними критеріями оцінювання. Здійснити оцінку теплової потужності осередку пожежі та визначити радіуси температурного впливу з урахуванням дії вітру, турбулентності повітряного потоку та висотного розподілу теплових потоків.

5. На основі отриманих закономірностей розробити удосконалений метод оцінювання безпечних протипожежних відстаней від вітрових електроустановок до суміжних об'єктів.

Об'єкт дослідження - процеси виникнення, розвитку та поширення пожеж між вітровою електроустановкою та суміжними об'єктами.

Предмет дослідження - конструктивні параметри вітрових електроустановок для оцінювання безпечних протипожежних відстаней.

Методи дослідження. При виконанні роботи використовуватимуться системний аналіз і узагальнення раніше виконаних робіт щодо дослідження процесів поширення пожеж між технологічними об'єктами та енергетичними установками; комплексне оцінювання пожежних ризиків, ефективності систем протипожежного захисту та прийняття технічних рішень, метод прогнозування щодо оцінка розвитку пожежі та часу досягнення критичних параметрів в середовищі, оптимізаційні методи та вибір раціональних складових програм-методики досліджень, систем математичне моделювання процесів теплообміну та поширення пожежі; розрахунковий метод із використанням польових моделей для оцінювання теплових впливів.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у одержанні нових науково обґрунтованих результатів, які в сукупності забезпечують удосконалення методу прогнозування небезпеки поширення пожежі на суміжні об'єкти від вітрових електроустановок з урахуванням їх конструктивних параметрів та аварійних сценаріїв, при цьому розвинено експериментальний метод визначення параметрів утворення зони пожежі та теплообміну з використанням імітаційного зразка об'єкта.

При цьому:

1. Вперше розроблено математичну модель визначення безпечної протипожежної відстані для вітрових електроустановок, яка відрізняється від існуючих урахуванням сценарію «руйнування – пожежа» та впливу вітрового навантаження на поширення теплового поля пожежі, що дало змогу встановити перевищення радіуса зони температур для суміжних об'єктів понад 250 °С над радіусом розливу оливи до 45 % за швидкості вітру понад 10 м/с та забезпечити підвищення точності визначення безпечних протипожежних відстаней для об'єктів вітроенергетики.

2. Вперше встановлено закономірність формування зони пожежі під час аварійного падіння та розгерметизації оливомісного корпусу вітрової електроустановки, яка на відміну від існуючих підходів, враховує сукупний вплив конструктивних параметрів установки та вітрового навантаження на геометричні характеристики зони пожежі, що дало змогу встановити перевищення відстані до найбільш віддаленого краю зони пожежі над геометричною висотою опори до 56 % та підвищити достовірність оцінювання небезпеки поширення пожежі.

3. Удосконалено метод оцінювання небезпеки поширення пожежі від вітрової електроустановки, відмінністю якого є врахування фактичних конструктивних параметрів об'єкта, кількості пожежної навантаги та найбільш несприятливих умов розвитку пожежонебезпечної ситуації, зокрема аварійних сценаріїв «руйнування – пожежа» та «пожежа – руйнування», що дало змогу підвищити точність визначення безпечних протипожежних відстаней для вітрових електроустановок в умовах аварійного розвитку пожежі.

4. Набула подальшого розвитку методика експериментального визначення параметрів теплообміну під час пожежі у відкритому просторі, яка, на відміну від існуючих, передбачає використання імітаційного зразка об'єкта, що піддається впливу найбільш несприятливих умов розвитку пожежонебезпечної ситуації.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій забезпечується: системним підходом до проблематики дослідження, точністю методів критичного аналізу, з використанням достовірних теоретичних і експериментальних вихідних даних, застосуванням сучасних

методів дослідження, проведенням перевірених експериментів, статистичною обробкою отриманих даних, а також узгодженістю результатів із відомими науковими фактами та практикою, застосуванням сучасних методів математичного моделювання, комп'ютерного моделювання процесів горіння, тепломасообміну та поширення вогню, використанням сертифікованого вимірювального обладнання та вимірювальних приладів, проведенням багаторазових повторних випробувань і порівнянням результатів із даними інших дослідників, доведеною збіжністю отриманих теоретичних результатів з результатами натурних вогневих досліджень; публікацією результатів проведених досліджень у вітчизняних фахових та іноземних наукових виданнях, а також публічним обговоренням результатів дослідження на міжнародних науково-практичних конференціях.

Практичне значення отриманих результатів.

Практична цінність дисертаційних досліджень полягає в отриманні нових експериментальних даних та встановленні залежностей, які характеризують процеси поширення пожежі між суміжними об'єктами з врахуванням їх конструктивних та технологічних параметрів, а також визначення умов безпеки для запобігання її подальшому розвитку.

Результати досліджень стали теоретичною та практичною основою під час проведення оцінки потенційних загроз при будівництві та експлуатації вітрових електроустановок (ВЕУ) в охоронній зоні аміакопроводу, розташованих у Лиманському районі Одеської області на замовлення УДП «УкрХімТрансАміак», а також у практичній діяльності Інституту наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України для розрахункової оцінки визначення безпечних протипожежних відстаней для вітрових електроустановок.

Результати дисертаційного дослідження можуть бути використаними для удосконалення нормативної бази, а також проєктними установами та експертами у галузі пожежної безпеки об'єктів будівництва.

Особистий внесок здобувача полягає в тому, що всі основні результати дисертаційного дослідження автором одержані самостійно та наведені в роботах, що представлені в додатку А. При проведенні дисертаційного дослідження здобувачем в роботі [1] проаналізовано існуючі методи оцінки безпечних протипожежних відстаней та сформульовано задачі досліджень. В роботі [2] розроблено методику досліджень поширення пожежі в разі аварій на вітровій електроустановці, обґрунтовано критерії оцінювання, методологію проведення досліджень, а також засоби вимірювальної техніки. В роботі [3] наведено систематизовані результати натурних вогневих досліджень під час імітації аварійної ситуації падіння вітрової електроустановки та її подальшого займання. В роботі [4] узагальнено результати натурних вогневих досліджень та сформульовано висновки на основі отриманих залежностей. В роботі [5] обґрунтовано методологічні аспекти проведення натурних вогневих досліджень та систематизовано отримані експериментальні дані. В роботі [6] обґрунтовано ключові чинники, які впливають на показники економічної доцільності впровадження удосконаленої системи вогнеперешкоджання. В роботі [7] обґрунтовано критеріальні умови, сценарій розвитку пожежі, а також розроблено газо-гідродинамічну модель вітрових електроустановок та середовища досліджень.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались та отримали схвалення на науково-практичних конференціях: XVII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів (м. Львів, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 30 березня 2022 р.), XVI International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment» (Київ: ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 15 листопада, 2022); XVIII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності» (м. Львів, Львівський державний університет безпеки

життєдіяльності, 30-31 березня 2023 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми надзвичайних ситуацій (Харків, Національний університет цивільного захисту України, 19 травня 2023 р.); XIX Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності» (м. Львів, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 28-29 березня 2024 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення» (м. Львів, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 13 грудня 2024 р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 7 наукових праць, у виданнях, включених МОН України до переліку фахових, а також 6 тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях в тому числі 1 входить до бази даних Scopus.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та 2 додатків. Загальний об'єм дисертації становить 148 сторінок та включає 46 рисунків, 9 таблиць та 117 джерел використаної літератури.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПОЖЕЖ НА ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

1.1 Аналіз пожеж та їх наслідків на вітрових електроустановках.

Статистичні дані, зібрані із загальнодоступних джерел Scotland Against Spin [1], свідчать про зростання кількості аварій на об'єктах вітроелектричної промисловості. Так, починаючи з 1996 року до 2025 року ними було зафіксовано 6427 аварій, в результаті яких 260 людей загинуло та 758 людей отримали травми. До того ж, 499 аварій спричинені пожежею вітрової електроустановки (далі - ВЕУ), питома вага яких становить 7,7 % від загальної кількості зареєстрованих аварій. Статистичні дані щодо кількості пожеж ВЕУ, зареєстрованих SAS, за останні 15 років наведені на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 Розподіл кількості пожеж ВЕУ за роками.

Дана діаграма демонструє коливання кількості пожеж. Хоча існують періоди зростання та спаду, загальна тенденція є відносно стабільною, без різких стрибків. Це може вказувати на ефективність певних заходів щодо запобігання пожежам протягом певного періоду, а також на необхідність посилення цих заходів в майбутньому.

Перехід на екологічно чисті джерела енергії набуває все більшого значення для вирішення проблем зміни клімату. Саме тому вітрова енергетика розвивається такими швидкими темпами, і на кінець 2011 року у світі налічувалося близько 200 тисяч ВЕУ, що розміщувалися як на суші, так і в морі. [2].

Так, на основі аналізу загальнодоступних даних, за попередніми оцінками, в середньому на кожній 8000÷15000 ВЕУ виникає одна пожежа. Тобто, зі збільшенням кількості встановлених ВЕУ і старіння існуючих може виникнути ситуація, що призведе до зростання кількості пожеж на ВЕУ.

Станом на кінець 2021 року 93% вітрових електростанцій (далі – ВЕС) від загальної їх кількості спроектовано та побудовано на суші, а решта 7% – у морі. Враховуючи можливий ризик поширення пожежі на суміжні об'єкти інфраструктури від ВЕУ, розташованих на суші, в нашій роботі будуть розглядатися лише ВЕУ, що побудовані чи будуються на суші.

В Україні функціонує 34 вітрові електростанції, з урахуванням тих, що знаходяться на території України та перебувають під тимчасовою окупацією військами російської федерації. До того ж, всі вони побудовані на суші, а найбільш потужніші на узбережжі Чорного та Азовського морів.

Перелік найбільш потужніших ВЕС в Україні та кількість вітрових електроустановок наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Перелік найпотужніших ВЕС в Україні.

№ з/п	Назва ВЕС	Потужність, МВт	Кількість вітрових електроустановок, шт
1	Ботіївська	200	64 (модель Vestas V-112 потужністю 3 МВт)
2	Приморська	200	52 (модель Wind Power GE-130 та GE-137 потужністю 3,8 МВт)
3	Мирненська	163	35 (модель VestasV-150 потужністю 4,2 МВт)
4	Орлівська	100	26 (модель Vestas V126 потужністю 3,8 МВт)
5	Новоазавська	80	23 (модель FL2500-100 потужністю 2,5 МВ)
6	Новотроїцька	72,6	12 (модель Vestas V126 потужністю 3,65 МВт) 8 (модель VestasV136 потужністю 3,6 МВт)
7	Овер'янівська	68,4	19 (модель VestasV136 потужністю 3,6 МВт).

На підставі проведеного аналізу карток обліку пожеж та статистичних даних встановлено, що в Україні, починаючи з 2019 року, на ВЕУ було зареєстровано 5 пожеж [3, 4], внаслідок яких було пошкоджено 1 будівлю та нанесено прямих збитків на суму близько 92 млн гривень. Причинами пожеж були

аварійні режими роботи в електрообладнанні ВЕУ та удар блискавки. Місцями виникнення пожеж були розподільчі пристрої, трансформатори, електричні кабелі та лопаті (див. рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Приклад пожежі ВЕУ та її наслідки.

Також, Українська вітроенергетична асоціація повідомляє, що у зв'язку з військовою агресією російської федерації проти України, початою 24 лютого 2022 року через обстріли на Мирненській ВЕС та ВЕС ТОВ «Сивашенергопром» згоріло по одній ВЕУ [5].

Складна ситуація склалася з пожежами на ВЕУ і в інших Європейських країнах.

Так, наприклад, в грудні 2022 року в Німеччині, через технічний збій в роботі ВЕУ, виникла пожежа. Прибувши на місце пожежі, пожежно-рятувальні підрозділи встановили, що пожежа розвивається на висоті 100 м від поверхні землі, та через високу швидкість вітру існувала загроза перенесення палаючих частин на значні відстані з послідуочим утворенням нових осередків пожежі. Окрім цього, проїзд по автомобільній дорозі, що знаходився поряд з ВЕУ, був повністю зупинений через потрапляння палаючих уламків на її поверхню. [6].

У липні 2020 року у Польщі, внаслідок удару блискавки в лопать ВЕУ, виникла пожежа. Пожежа не мала інтенсивного горіння, оскільки лопать знаходилася перпендикулярно до землі і вогонь повільно поширювався згори до

низу. Гасіння пожежі проводилося за допомогою пожежного гелікоптера та тривало близько 3-х годин [7].

У серпні 2016 року в Німеччині через технічний збій в роботі ВЕУ виникла пожежа. Прибувши, пожежно-рятувальні підрозділи не змогли ліквідувати пожежу на початковій стадії її розвитку через відсутність необхідної техніки та засобів для подачі вогнегасних речовин до зони горіння [8].

У жовтні 2013 року в Нідерландах при плановому технічному обслуговуванні вітряної установки, під час якого всередині конструкції ВЕУ знаходилися чотири працівники, виникла пожежа. В результаті швидкого поширення полум'я двоє працівників загинули, а саме: один, рятуючись від вогню, зістрибнув з гондоли вітряної установки, а тіло іншого знайшли в її залишках. Двома працівникам вдалося врятуватися, проте вони зазнали значних ушкоджень дихальних органів через отруєння продуктами згорання [8].

Таким чином, пожежі ВЕУ призводять до загибелі та травмування людей, великих економічних збитків та поширюються на суміжні об'єкти. А двома найпоширенішими вузлами виникнення пожеж є електророзподільні шафи та трансформатори.

1.2 Систематизація причин пожежонебезпечних ситуацій на вітрових електроустановках

Галузь вітроенергетики є сьогодні однією з провідних галузей у секторі відновлюваної енергії, що забезпечує доступне та стійке енергетичне рішення. Однак, вітрова промисловість стикається з низкою проблем, однією з яких є пожежі. Адже конструкції ВЕУ містять всі умови для виникнення стійкого полум'яного горіння, а саме паливо (нафтопродукти та полімери), кисень (вітер) і джерело запалювання (іскри електричного та механічного походження тощо). Додаткова пожежна небезпека обумовлена самою конструкцією ВЕУ, що полягає у зосередженні значної кількості горючого матеріалу та потенційних джерел запалювання, що обмежені конструкціями гондоли ВЕУ. До того ж, з метою зниження ваги гондоли, для її облицювання використовують полімерні матеріали.

Ризики виникнення пожежі ВЕУ пов'язані із зовнішніми чинниками, такі як погода, несправність обладнання чи антропогенний фактор (помилкові дії обслуговуючого персоналу). Роботи з технічного обслуговування відіграють вирішальну роль у запобіганні пожежам, оскільки багато випадків пожеж спричинені несправністю старих або слабких пристроїв, які слід замінити, або неякісно виконаним ремонтом. Старіння турбіни є ще одним фактором, який підвищує ризик виникнення пожеж. За даними, наведеними в дослідженні [9], у США є тисячі енергетичних турбін потужністю від 80 до 150 кВт, встановлених десятиліття тому, які не мають жодної або мають дуже слабку систему блискавкозахисту. З огляду на велику кількість ВЕУ, встановлених з 2000-х років, кількість пожеж у найближчі кілька десятиліть може стати більш серйозною проблемою, ніж зараз.

Розглянемо більш детально можливі причини виникнення пожеж.

Однією з таких причин є удар блискавки. Удар блискавки – природне явище, яке виникає в електрично заряджених областях хмар і досягає Землі у вигляді електричних розрядів. Нові потужні ВЕУ можуть досягати висоти 220 м, що робить їх ще більш сприятливими для влучання блискавок. Незважаючи на те, що ВЕУ, відповідно до вимог [10], мають бути оснащені системами блискавкозахисту, влучання розряду блискавки в конструкцію ВЕУ залишається одним з найпоширеніших джерел для виникнення пожеж. Протягування розряду блискавки залежить від різниці в електричному потенціалі між електрично зарядженими хмарами та ВЕУ. Оскільки її металеві конструкції можуть мати від'ємно заряджений потенціал, що підвищує ймовірність удару в ці конструкції.

Дослідження аеродинаміки лопатей ВЕУ показують, що під час її роботи вітровий потік створює дві зони високого та низького тиску завдяки принципу Бернуллі. Відповідно до закону Пашена, повітря в зоні високого тиску стає більш діелектричним, що ускладнює проведення електричного струму. Разом з тим, повітря стає більш провідним для зон з низьким тиском. Найнижче значення тиску називають напругою пробою, оскільки повітря в даній зоні є найбільш сприятливим. Це явище пояснює чому при обертанні лопатей ВЕУ розряд

блискавки іноді влучає в лопаті, направлені донизу, адже повітря в цьому просторі має менший тиск, а, отже, є менш діелектричним.

Відповідно до звітів страхових компаній, механічна несправність або вихід з ладу механізмів є ще одним фактором, що сприяє виникненню пожеж ВЕУ. Аварійні ситуації можуть виникати у різних частинах ВЕУ з різних причин. Знос або пошкодження зубчастих передач, перегрів підшипників, втома металу, використання неякісної оливи, вібрація та перевантаження є одними з найпоширеніших причин пожеж. До прикладу, підшипники завжди повинні бути змащеними, і, якщо з якихось причин вони почнуть висихати, тертя призведе до їх перегріву та утворення достатньої кількості іскор для виникнення пожежі. Ще одним можливим джерелом пожежі є механічне гальмування ротора. Дані системи встановлюються на ВЕУ для екстреної зупинки ротора у випадках неправильної роботи системи контролю аеродинамічного гальмування. Через високу швидкість обертання ротора ці гальма можуть досягти високої температури, достатньої для займання горючих матеріалів та рідин.

Аварійна робота електричних компонентів також є однією з найпоширеніших причин пожежі. Вплив зовнішніх чинників або дефекти можуть призвести до струмового перевантаження, що згодом може призвести до нагрівання та виникнення пожежі. Іншими факторами, що спричиняють пожежі в електричних системах та установках ВЕУ, є коротке замикання та електричні дуги. До таких систем та установок, розташованих в гондолі, відносяться автоматичні вимикачі, інвертори, конденсатори, системи керування, електричні батареї та трансформатори. Акумуляторні батареї у ВЕУ використовуються в деяких допоміжних системах, таких як система керування ВЕУ. Вони повинні проходити технічне обслуговування та працювати з достатньою вентиляцією, особливо свинцево-кислотні. Цей тип батарей може виділяти водень під час заряджання, який нагріває корпус батареї, що в свою чергу становить ризик виникнення пожежі або вибуху. Електричні системи, до складу яких входять ємнісні елементи (конденсатори, регулятори реактивної потужності тощо) та індуктивні (генератори, двигуни тощо), можуть спричинити пошкодження

електроустановок. Автоматичні вимикачі – це пристрої, в яких може статися перегрів через великі перехідні опори, спричинені нещільними контактами на ділянках болтових з'єднань. Через постійний вплив потоку вітру у ВЕУ виникають вібрації, що призводять до послаблень деяких гвинтових з'єднань в автоматичних вимикачах та електричних системах. В електричній системі ослаблене гвинтове з'єднання може призвести до збільшення електричного опору на даній ділянці і тим самим спричинити перегрів і, як наслідок, може виникнути пожежа. Трансформатори також становлять небезпеку виникнення пожежі, особливо якщо вони розташовані в середині гондоли та є оливнонаповненими. На додаток, у випадку витoku оливи воно сприятиме поширенню пожежі всередині гондоли.

Майже у всіх випадках виникнення пожеж у гондолах ВЕУ не вдається їх ліквідувати на початковій стадії розвитку пожежно-рятувальними підрозділами. Насамперед це пов'язано із пізнім виявленням пожежі на ВЕУ, значною відстанню розташування до таких об'єктів пожежно-рятувальних підрозділів, а також відсутність технічних засобів для подачі вогнегасних речовин до місця пожежі.

Статистичні дані свідчать, що в понад 90% випадків пожеж, які виникли в гондолах ВЕУ, відбувається повне її вигорання або значне пошкодження конструкції ВЕУ, що завдає підприємствам значних матеріальних збитків, а у деяких випадках через утворення вторинних осередків пожежі можуть виникати лісові пожежі.

Через важливість і зростання обсягів використання вітрової енергії, як основного джерела відновлюваної енергії, дослідження ризиків виникнення аварій, пожеж та відмов на ВЕУ привернули увагу науковців.

Так, в роботі [11] автор провів аналіз понад 700 випадків аварій та несправностей ВЕУ, що були у відкритому доступі за останнє десятиріччя. Отримані результати досліджень можна використати для підвищення пожежної безпеки вітрових турбін.

Наразі, з метою своєчасного виявлення пожежі, сучасні ВЕУ облаштовуються системами протипожежного захисту, блискавкозахисту, які встановлюються під час виробництва. Ефективна робота пожежної сигналізації є критично важливою. Проте, як зазначається в статті [12], значна кількість спрацювань є хибними, а неналежний технічний стан сповіщувачів може призвести до неналежного функціонування системи, що ставить під загрозу своєчасне виявлення пожежі. Найбільш поширеними причинами пожеж у ВЕУ є несправності у вузлах та агрегатах, природні явища або помилкові дії людини. Пожежі на ВЕУ призводять до пошкодження самих ВЕУ, ВЕС і пов'язаних з ними об'єктів, наприклад доріг та лісових масивів. А у окремих випадках пожежі ВЕУ можуть призводити до загибелі або травмування людей.

Автори в роботі [13] на основі чотирьох вибраних випадків пожеж на ВЕУ у світі, дослідили загальні причини їх виникнення і методи захисту та підкреслили унікальний характер пожежної проблеми, з якою стикається вітроенергетична галузь.

В роботі [14] розглядаються проблемні питання дотримання протипожежних відстаней від вітрових електроустановок до лісових масивів та аналізу наслідків в результаті виникнення лісових пожеж. Проте дані дослідження не розкривають проблемні питання методики оцінювання безпечних протипожежних відстаней та забезпечення технічного регулювання в даній сфері пожежної безпеки.

В роботі [15] представлено аналіз аварійних ситуацій, причин їх виникнення та наслідків, в тому числі в результаті виникнення пожеж на вітрових електроустановках. Важливим аспектом даних досліджень є врахування дистанції, на якій спостерігалось руйнування елементів вітрових установок та їх вплив на суміжні об'єкти. На рисунку 1.3 наведено ситуаційну діаграму аварійних випадків, на якій приведено дистанції розсіювання уламків від вітрових електроустановок внаслідок аварій, які виникали в США та 2008-2023 роки [15].

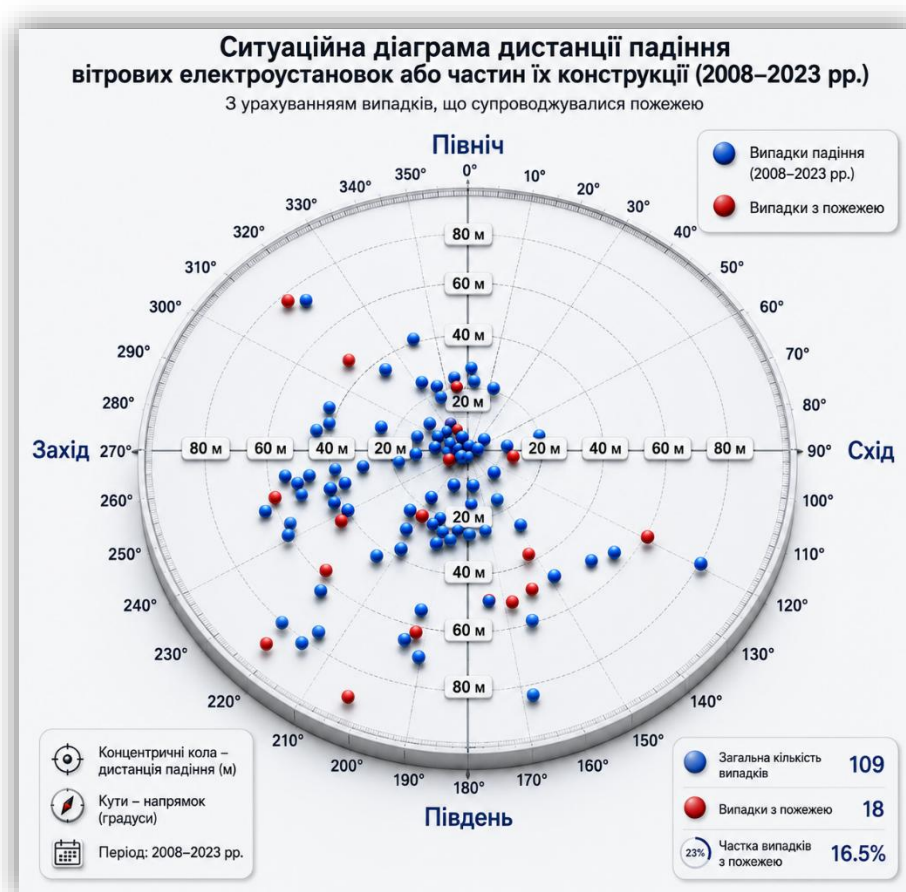


Рисунок 1.3 – Ситуаційна діаграма дистанції розсіювання уламків ВЕУ за 2008-2023 роки.

Аналіз діаграми свідчить, що руйнування та розкидування фрагментів вітрових електроустановок в значній мірі залежить від напрямку обертання робочих лопатей, при цьому в окремих випадках розкид великих уламків становив до 90 м. Отримані дані дозволяють з більшою точністю прогнозувати ризики аварійних ситуацій, в тому числі пожежонебезпечних сценаріїв.

В роботі [16] розглядалися питання аварійних ситуацій на вітрових електростанціях, які супроводжувалися руйнуванням їх несучої опори, проте в даній роботі не розкриваються питання виникнення та розвитку пожежі внаслідок таких аварій, хоча вони і були зафіксовані та спричинили значні збитки для суміжної інфраструктури. На рисунку 1.4 наведено фото даних випадків.



Рисунок 1.4 – Фото руйнувань ВЕУ, що супроводжувалися пожежами та пошкодженням прилеглої інфраструктури.

Дослідження, проведені [17-19], емпірично та чисельно обґрунтовують критичну роль протипожежної відстані у запобіганні поширенню вогню, встановлюючи експоненційну залежність часу займання від мінімальної відстані між об'єктами та визначаючи вплив теплового потоку і властивостей матеріалів на пожежну безпеку.

Таким чином, аналіз аварійних ситуацій та попередніх досліджень в частині забезпечення обмеження поширення пожеж між об'єктами свідчить, що існуючі методи визначення протипожежних відстаней не в повній мірі враховують можливість руйнування об'єкту, що призведе до скорочення початкової протипожежної відстані та подальше виникнення пожежі гондоли, в середині корпусу якої знаходяться оливонаповнені вузли та агрегати. В даному випадку важливим чинником є висота башти, на якій встановлено оливонаповнене обладнання та інша горюча навантага [20]

1.3 Аналіз та систематизація за типами та пожежною небезпекою вітрових електроустановок

Вітрова електроустановка являє собою пристрій, призначений для перетворення кінетичної енергії повітряного потоку в електричну енергію. Існує два види ВЕУ: з горизонтально-осьовою та вертикально-осьовою віссю обертання (див. рис. 1.5) [21].



а)

б)

Рисунок 1.5 – Загальний вигляд вітрових електроустановок:

а - з горизонтальною віссю обертання; б - з вертикальною віссю обертання.

До ВЕУ з вертикальною віссю обертання відносяться установки, розробниками дизайнів яких були фінський винахідник Зигмунд Йоханнс Савоніус, який у 1929 році запатентував свій винахід (ротор Савоніуса), та французький інженер Жорж Дар'є - отримав патент у 1931 році на винахід (ротор Дар'є) (див. рис. 1.6).

ВЕУ по типу ротора Сивоніуса складається із щогли і двох або декількох лопатей у формі порожнистих напівциліндрів, зміщених відносно один одного. Робота ротора побудована на різниці опорів, яка виникає при обтіканні повітряним потоком крил ротора. Рух лопатей навколо центральної осі досягається за рахунок опукло – увігнутої форми лопатей.



а) ротор Сивоніуса

б) ротор Дар'є

Рисунок 1.6 – Загальний вигляд ВЕУ з вертикальною віссю обертання.

Конструкція ротора проста, тому відрізняється міцністю, адже вона виготовлена з металу і має висоту до 3 м.

Вітрова електроустановка по типу ротора Дар'є є симетричною конструкцією, що складається з двох і більше аеродинамічних крил, закріплених на радіальних балках. На кожне з крил, що рухаються в напрямку потоку вітру, діє підйомна сила, величина якої залежить від кута між векторами швидкості потоку вітру та миттєвої швидкості крила. Ці установки заввишки 17-19 м і їх основні компоненти та системи керування знаходяться на поверхні землі, що у випадку виникнення пожежі дає можливість пожежно-рятувальним підрозділам швидко ліквідувати її.

Найбільш поширеними у використанні є ВЕУ з горизонтальною віссю обертання. Основними елементами установки є вітроприймальний пристрій (лопаті), редуктор передачі крутільного моменту до електрогенератора, електрогенератор і башта. Вітроприймальний пристрій разом з редуктором утворюють вітродвигун. Завдяки спеціальній конструкції лопатей в повітряному потоці виникають несиметричні сили, які створюють крутільний момент.

За кількістю лопатей ВЕУ поділяють на: однолопатеві, дволопатеві, трилопатеві та багатолопатеві.

Ще одним різновидом ВЕУ є розробка Іспанської компанії Vortex Bladeless вихрового резонансно-вібраційного генератора (див. рис. 1.7). Особливістю даної установки є легкий довгий циліндр, який під впливом вітру здійснює коливальні рухи, які в свою чергу перетворюються в електричну енергію. Також, установка не містить мастила та лопатей.

Слід відмітити, що найменша модель потужністю до 3 Вт має висоту 1 м, а найпотужніша модель 4 кВт має висоту 12,5 м. [22].



Рисунок 1.7 – Загальний вигляд вихрового резонансно-вібраційної ВЕУ.

Загалом, за рівнем потужності ВЕУ поділяють на малопотужні (до 100 кВт), середньої потужності (понад 100 кВт до 1000 кВт) та великої потужності (понад 1000 кВт).

До складових частин та систем ВЕУ належать:

- ротор, що включає систему обертових аеродинамічних елементів, приєднаних до єдиного вала, який перетворює кінетичну енергію вітру в механічну енергію обертового валу;
- лопать - аеродинамічна активна обертова частина ротора, яка сприймає енергію повітряного потоку та перетворює її в обертальний рух валу ротора;
- опора - частина установки, яка тримає конструкцію над поверхнею землі;
- електрогенерувальна система - це сукупність функційно взаємопов'язаних електричних систем, пристроїв, перетворювачів, кабелів, з'єднувачів та інших пристроїв, які забезпечують вироблення та транспортування споживачам електричної енергії необхідних параметрів [21].

За місцем встановлення розрізняють наземні та офшорні (ті, що встановлюються в акваторії) ВЕУ.

Проведеним аналізом [23] встановлено, що найбільш пожежонебезпечними є ВЕУ з горизонтально-осьовою віссю обертання, оскільки у них наявна велика кількість пожежного навантаження та джерел запалювання.

Пожежне навантаження ВЕУ з горизонтальною віссю обертання майже все знаходиться в гондолі та включає: внутрішню пінну звукоізоляцію, що в деяких частинах може бути забруднена оливою; електроустановки та кабелі; пластиковий корпус та оливу в гідравлічних системах. Слід відмітити, що у випадку пошкодження оливопроводів чи підвищенні його температури за рахунок високого тиску у них, гідравлічна олива, що витікає тонко розпилюваним струменем, може спричинити вибух всередині гондоли. Також, всередині гондоли наявна трансмісійна олива та інша олива, що використовуються для змащення поверхонь, що обертаються.

Найбільш поширені ВЕУ з горизонтальною віссю обертання, а саме потужністю до 1,5 МВт, містять 900-1000 л мастила, а ще близько 2000 л може міститися в трансформаторі, який розташовано на поверхні землі поряд з вітровою електроустановкою. Відповідно до [24, 25] дана технічна олива є горючою рідиною, і у разі виникнення несправностей на ВЕУ вона, маючи значне пожежне навантаження, може призвести до пожежі значної площі та, відповідно, сприяти її розвитку і поширенню на суміжні наземні об'єкти інфраструктури.

Окрім ефекту падіння несучої опори, висота якої впливає на скорочення значення довжини дистанції протипожежної відстані, слід враховувати ефект утворення «кратеру» від значної ваги гондоли, в корпусі якої знаходиться олива. Даний ефект «кратеру» може мати позитивний та негативний вплив на процес поширення пожежі.

Серед позитивних чинників можливого ефекту утворення «кратеру» є утворення штучного земляного бар'єру, який локалізує розтікання оливи з гондоли в межах місця її падіння. Негативним явищем ефекту «кратеру» є можливість пошкодження підземних комунікацій, зокрема нафто-газопроводів та аналогічних об'єктів критичної енергетичної інфраструктури, які можуть знаходитися в зоні розміщення ВЕУ.

З точки зору найгіршого сценарію пожежі, яка супроводжується руйнуванням вежі ВЕУ, є руйнування основи та пряме падіння опори вежі в сторону суміжного об'єкту, при цьому корпус гондоли розламується при падінні

на землю, а мастило розтікається та загоряється. На рисунку 1.8 наведено фото випадку аварії вітрової електростанції висотою 48 м при руйнуванні основи несучої опори вежі.



Рисунок 1.8 – Приклад падіння ВЕУ через руйнування несучої опори в 2019 (США).

Таким чином, під час перегляду методу визначення безпечних протипожежних відстаней серед найбільш пожежонебезпечних сценаріїв аварії на ВЕУ можливо відзначити наступні випадки:

- загоряння та падіння окремих елементів вітрової електростанції в зону розміщення суміжних об'єктів;
- падіння вежі в зону розміщення суміжних об'єктів (часткове чи повне) та подальше займання оливи, що розтікається через механічне пошкодження корпусу гондоли.

Окрім цього, слід враховувати, що висота вежі, діаметр ротора та кількість оливи в механізмах вітрогенерувального обладнання є взаємопов'язаними чинниками, а саме – чим вище вежа, тим більша кількість оливи, а, відповідно, і пожежної навантаги знаходиться в корпусі установки. В таблиці 1.2 наведено дані щодо кількості оливи в корпусі гондоли в залежності від висоти та потужності вітрової електроустановки [26, 27].

Таблиця 1.2 – Дані щодо кількості оливи в механічній частині ротора ВЕУ в залежності від її висоти.

Н/п	Потужність вітрової електроустановки, МВт	Висота башти, м	Діаметр ротора, м	Кількість оливи у об'ємі механічної частини ротора, л
1	0,03	18	10	12 (±2)
2.	0,075	22	17	30 (±4)
3.	0,1	24	20	40 (±5)
4.	0,2	30-38	25	80 (±12)
5.	0,5	40-53	39	200 (±25)
6.	0,9	61-73	52	360 (±40)
7.	2,0	60-78	80	720 (±60)
8.	3,0	80-105	90	1200 (±90)
9.	4,2	104-112	136	1200 (±90)
10.	5,6	119-166	162	1680 (±100)
11.	7,2	112-199	172	2720 (±170)
12.	9,5	індивідуально	174	3800 (±200)

Як зазначалося вище, олива в достатній кількості наявна в гондолі ВЕУ. Під час тривалого нагрівання, в умовах експлуатації, ця олива може розкладатися, випаровуватися, утворювати теплове випромінювання, дим та токсичні гази. Як наслідок, становити велику загрозу виникнення та розповсюдження пожежі в об'ємі гондолою, а в деяких випадках призводити до травмування та загибелі операторів, працівників та робітників з технічного обслуговування.

На даний час проведено небагато досліджень щодо пожеж у ВЕУ, особливо тих, що стосуються поведінки типової оливи, розташованої в гондолі та оцінці її пожежної небезпеки. Деякі роботи зосереджені лише на причинах пожеж та відповідних системах протипожежного захисту.

В цій роботі будуть досліджуватися процеси теплообміну, а також умови поширення пожежі від ВЕУ в разі їх загорання.

1.4 Вимоги нормативно-правових актів в частині забезпечення обмеження поширення пожежі від вітрових електроустановок

В Україні, вимоги щодо мінімальних протипожежних відстаней між будівлями та спорудами визначаються відповідно до будівельних норм [28]. Відповідно до вимог даних норм, протипожежні відстані між будинками і спорудами визначаються з урахуванням відстані між зовнішніми стінами або іншими зовнішніми огорожуючими конструкціями, зокрема виступаючими елементами даху. Визначення та дотримання протипожежних вимог в частині протипожежних відстаней між будинками або зовнішніми установками є передумовою для забезпечення обмеження поширення пожежі між об'єктами різного функціонального призначення.

Якщо для будівель і споруд з визначеним ступенем вогнестійкості встановлено нормовані значення протипожежних відстаней [28], то для зовнішніх установок, до яких відносяться вітрові електроустановки, вони визначені лише частково та встановлені в галузевих нормах. Наприклад, в документі [29] визначені вимоги до протипожежних відстаней в електроустановках, зокрема відстаней від кабельних мереж та електро-розподільних мереж до будинків та споруд тощо.

Національними стандартами України у сфері вітроенергетики визначено, що все обладнання, механізми, системи та споруди вітрових електростанцій мають відповідати вимогам пожежної безпеки передбаченими [30]. Разом із тим, нормативні документи щодо протипожежного захисту такого роду об'єктів, які є пожежонебезпечними, на жаль, в Україні відсутні. В той час як в Німеччині й у деяких країнах Європи питання пожежної безпеки частково розкриваються в стандарті VdS 3523 «Вітрові турбіни. Інструкція з протипожежного захисту» [31].

Згідно з вимогами [32], що стосуються проєктування, будівництва (нового будівництва, реконструкції, капітального ремонту) та технічного оновлення генеруючих потужностей, всі ці заходи повинні відповідати законодавству у галузі міського планування. Позитивним результатом сучасного законодавства, яке регулює міське будівництво, є тенденція до впровадження ефективних

механізмів, спрямованих на забезпечення гармонії між публічними та приватними інтересами на всіх етапах будівництва вітрової електростанції. Ця гармонія враховує можливий негативний вплив ВЕУ на довкілля, потенційні загрози для здоров'я людей і можливі матеріальні та соціальні втрати. Розвиток галузі вітроенергетики нерозривно пов'язаний із потребою дотримуватися екологічних стандартів під час будівництва та експлуатації ВЕУ.

В 2017 році було введено перехід від категорій складності об'єктів будівництва до класів наслідків (відповідальності) і спрощену процедуру експертизи проєктів будівництва, видачу будівельних дозволів та прийняття в експлуатацію завершених об'єктів будівництва [33]. Наразі всі об'єкти поділяються на класи наслідків (відповідальності): незначні наслідки (СС1), середні наслідки (СС2) та значні наслідки (СС3), які визначаються згідно з [34]. Клас наслідків впливає на складність, обсяг документації та порядок проведення будівельних робіт. Ці зміни, безперечно, мають вплив на вітроенергетичну галузь.

Новації, внесені до [35], включають в себе два основні аспекти.

По-перше, об'єкти, які генерують електроенергію з вітрової енергії, були віднесені до об'єктів із незначними наслідками (СС1) за умови, що отримано позитивний висновок уповноваженого органу з оцінки впливу на довкілля. Це означає, що вітрові електростанції, які не мають серйозного негативного впливу на довкілля та не несуть значних ризиків для громадськості, можуть бути класифіковані як об'єкти із незначними наслідками.

По-друге, проєкти будівництва вітрових електростанцій, які за класом наслідків (відповідальності) віднесені до об'єктів із незначними наслідками (СС1), більше не потребують обов'язкової експертизи проєктів будівництва. Однак, обов'язкова експертиза залишається для проєктів будівництва вітрових електростанцій, які за класом наслідків (відповідальності) віднесені до об'єктів із середніми (СС2) та значними (СС3) наслідками або для яких передбачена оцінка впливу на довкілля відповідно до [36].

У випадку будівництва вітрового парку або ВЕС, які мають дві або більше ВЕУ, висота яких становить 50 метрів і більше, і які віднесені до другої категорії

видів планованої діяльності та об'єктів, які можуть мати значний вплив на довкілля та підлягають оцінці впливу на довкілля (далі – ОВД), будівельні роботи можуть розпочинатися після отримання дозволу на початок будівництва.

Процедура прийняття в експлуатацію об'єктів ВЕС, що підпадають під ОВД, визначається відповідно до чинного законодавства та може включати етапи оцінки впливу на довкілля та отримання забудовником сертифіката передбачено лише для об'єктів, які за класом наслідків належить до об'єктів із середніми (СС2) та значними (СС3) наслідками.

Водночас, маючи на меті спрощення процедури отримання дозвільних документів для початку будівництва ВЕС, запроваджені містобудівні правові вимоги є неоднозначними і суперечливими, адже питання мінімальних протипожежних відстаней до суміжних наземних об'єктів інфраструктури та підземні комунікації не визначено.

Відповідно до вимог, передбачених [10] ВЕС слід проектувати на відстані не менше 1 км від населеного пункту, при цьому попередньо здійснивши розрахунок рівня шуму. В цьому ж документі також рекомендується ВЕУ, що функціонують у складі ВЕС, розміщувати на відстані два, три діаметри ротору, що зумовлено найбільшою ефективністю виробництва енергії.

Разом з тим, незважаючи на досить вичерпну нормативну базу в галузі будівництва та організації протипожежних заходів, що включає питання дотримання пожежної безпеки при проектуванні, реконструкції та експлуатації енергетичних підприємств, мінімальні протипожежні відстані від ВЕУ до суміжних наземних об'єктів інфраструктури та підземних комунікацій не визначені нормативно.

Також, відповідно до вимог [37], а саме п. 5.2, визначення величини протипожежної відстані, якщо така величина не встановлена нормативним документом, може здійснюватися з використанням розрахункових або експериментальних методів.

Визначення протипожежних відстаней між суміжними будинками (спорудами) є підтвердженням дотримання основної вимоги до споруд,

визначеної постановою Кабінету Міністрів України від 20.12.2006 року №1764 «Про затвердження Технічного регламенту будівельних виробів, будівель і споруд» [38], а саме: поширення вогню та диму на сусідні споруди і прилеглі території повинно бути обмежене.

Згідно з [37], протипожежна відстань – це нормована відстань між будинками, яку встановлюють для запобігання розвитку пожежі.

Визначення безпечних протипожежних відстаней з використанням розрахункових методів здійснюється з використанням процесів теплообміну. Питання взаємозв'язків та впливу теплового потоку від пожежі на суміжні об'єкти досліджувалося низкою вчених, однак їхні дослідження не в повній мірі охоплюють питання визначення протипожежних відстаней для вітрових електроустановок.

Для визначення протипожежної відстані за спрощеним методом визначають тепловий баланс поверхні об'єкта, що сприймає тепло від вогнища пожежі, за певної відстані, коли температура такої поверхні не перевищує допустимої температури. У цьому разі враховують втрати тепла через необігрівну поверхню. Суть даного методу полягає у розв'язанні рівняння теплового балансу, яке найзручніше розв'язати шляхом побудови графіка функції. А мінімальною протипожежною відстанню буде найближче більше ціле значення до точки перетину відповідною кривою осі абсцис. Проте, цей метод не завжди застосовний для вітрових електроустановок через їхню специфіку конструкції та аварійних сценаріїв, які було описано вище [39].

Розроблена методика [40] дослідження впливу густини теплового потоку на елементи суміжних будівельних об'єктів описує залежність тривалості теплового впливу на протипожежну відстань між об'єктами. Сутність даної методики визначення протипожежної відстані між об'єктами за критерієм теплового потоку полягає у визначенні його величини на поверхні суміжного будівельного об'єкту, що опромінюється від пожежі об'єкту, що горить

На сьогоднішній день під час визначення протипожежних відстаней від вітрових електроустановок до суміжних об'єктів за допомогою [41] в більшій мірі

можливо застосовувати розрахунковий метод визначення протипожежних відстаней з використанням рівняння променистого теплообміну і рівняння нестационарної теплопровідності, а також метод визначення протипожежних відстаней з використанням польових моделей.

На сьогоднішній день визначення мінімально необхідних протипожежних відстаней між будинками та спорудами може реалізуватися такими методами: розпорядчий метод, параметричний метод, експериментальний метод про переваги та недоліки кожного було розглянуто в [42,43].

Що стосується міжнародного досвіду будівництва ВЕУ, можна сказати наступне. У 2014 році законодавством Баварії [44] було встановлено мінімальну відстань від населеного пункту до ВЕУ. Ця відстань повинна бути у 10 разів більшою за висоту ВЕУ (див. рис. 1.9).

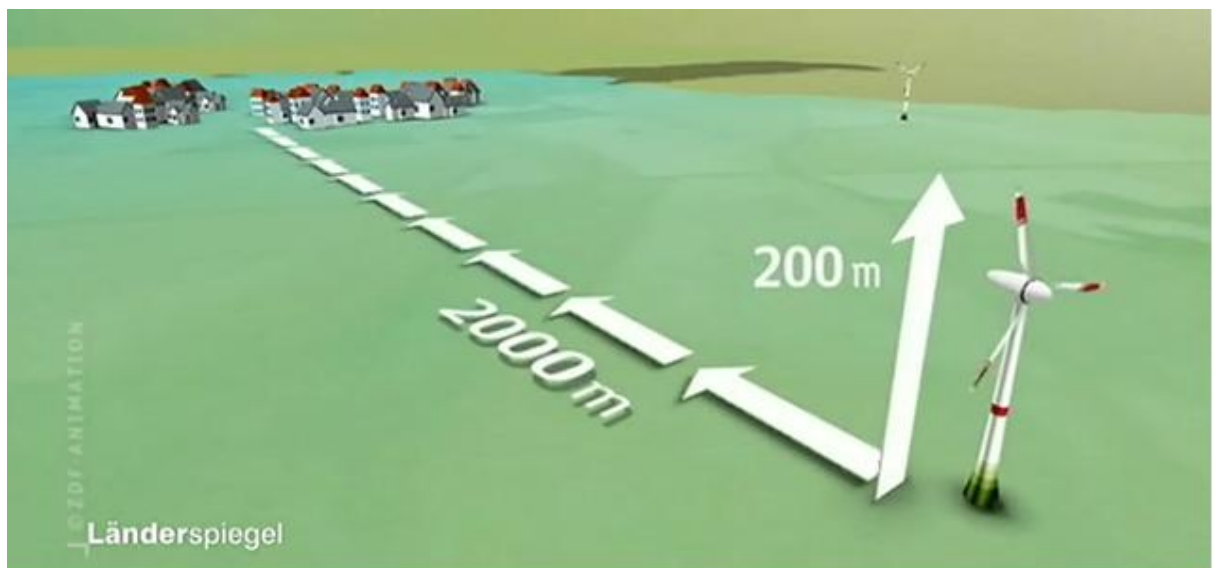


Рисунок 1.9 – Вимоги розташування ВЕУ по відношенню до населеного пункту в Баварії.

Дана вимога, в першу чергу, забезпечувала безпеку людей у разі виникнення механічної аварії на вітровій електроустановці. А саме, у випадку відриву частин лопатей в процесі роботи вітрової електроустановки, їх частини могли відлітати на відстань, що перевищує у 10 разів висоту вітрової електроустановки. Наприклад, від вітрової електроустановки висотою 125 м, за

принципом балістики, лопать могла відлітати на відстань близько 1300 м від вітрової електроустановки, що наведено на схемі рисунку 1.10 [45, 46].

З аналізу попередніх досліджень, наведених в [15], стало відомо, що мінімальні відстані від промислових ВЕУ до населених пунктів в різних країнах встановлені по різному, як виробниками, так і законами чи нормативно-правовими актами (див. табл. 1.3)

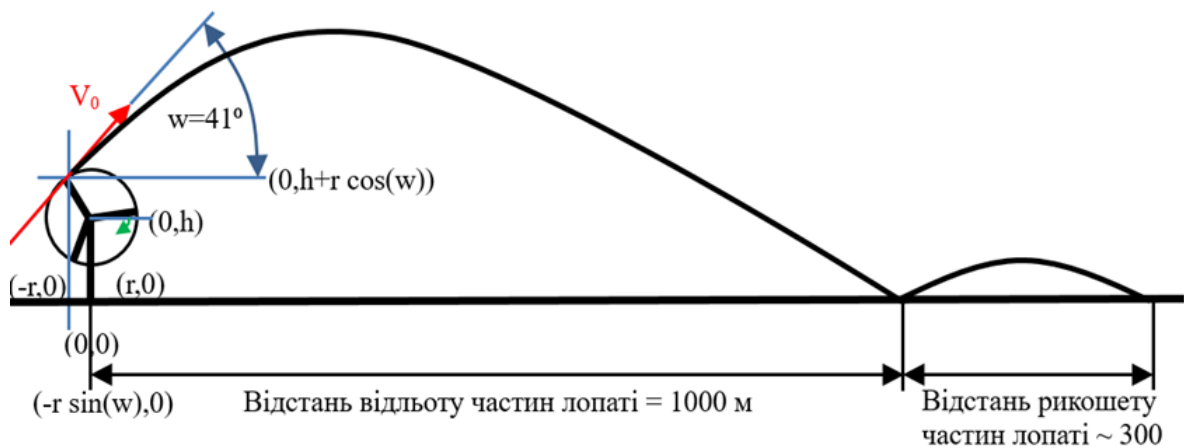


Рисунок 1.10 – Схема можливого руйнування та відльоту механічних частин механізму ВЕУ.

Таблиця 1.3. – Вимоги до відстаней від промислових ВЕУ до населених пунктів.

№ п/п	Оператор	Відстань, м
1	Рекомендація виробника	396
2	Національна дослідницька рада США	762
3	Німеччина	1609
4	Франція	1609
5	Канада, сільська місцевість	1981
6	Каліфорнія США	3218
7	Мічиган США	304
8	Вісконсин США	304
9	Франція	1448

Як бачимо, відстань від ВЕУ до населених пунктів відрізняється в залежності від місця їх встановлення. Наприклад, у штатах Вісконсин та Мічиган

США ліцензійні комісії видали ліцензії на будівництво ВЕУ на відстані 304 м від житлового будинку. В європейських країнах ця відстань в 5,3 рази більша та становить 1609 м, а в Каліфорнії - ще більша і становить 3218 м.

В США Національною асоціацією протипожежного захисту (NFPA) видано стандарт NFPA 850 [47], в якому вказано на важливі аспекти безпеки при будівництві ВЕУ, які необхідно враховувати для запобігання виникнення пожеж.

В Іспанії Національний інститут безпеки та гігієни на роботі (INSHT) розробив спеціально для врегулювання питання з будівництвом та експлуатацією ВЕУ три стандарти NTP 1022, 1023 і 1024 [48-50], які описують основні заходи профілактики та захисту під час обслуговування вітрових турбін. В стандартах передбачено запобіжні заходи для зниження ризику виникнення пожеж, причини виникнення яких пов'язані з помилковими діями обслуговуючого персоналу. Стандарти також рекомендують використовувати вогнезахисні засоби в місцях устаткування з високим ризиком займання.

В Європейських країнах директива 2006/42/CE [51] визначає стандарти, яким мають відповідати машини та механізми. І хоча вона безпосередньо не стосується ВЕУ та ВЕС, все ж таки в ній прописані положення спрямовані на мінімізацію ризиків для життя і здоров'я людей, навколишнього середовища при експлуатації машин і механізмів. А також зниження втрат і витрат держави на ліквідацію наслідків від роботи неякісного обладнання або його неправильного використання. У директиві про протипожежний захист зазначено: «Машина має бути розроблена та виготовлена таким чином, щоб уникнути будь-якого ризику пожежі чи перегріву, спричиненого самою машиною або газами, рідинами, порошками, парами тощо».

Висновки до розділу I

У результаті аналізу сучасного стану пожеж на вітрових електроустановках встановлено, що, незважаючи на відносно низьку частоту виникнення таких випадків, їх наслідки можуть бути значними та нести загрозу для життя і здоров'я людей, а також бути причиною значних економічних збитків.

Основними причинами пожеж є технічні несправності електрообладнання, короткі замикання, перегрів компонентів системи, а також вплив блискавок. Аналіз показав, що більшість пожеж виникає у верхній частині турбіни, що ускладнює гасіння і збільшує ризики поширення вогню на навколишні об'єкти, що підкреслює необхідність удосконалення систем протипожежного захисту та нормативного регулювання у сфері вітроенергетики.

За результатами проведеного аналізу встановлено, що станом на сьогоднішній день відсутні нормативно визначені підходи щодо визначення протипожежних відстаней від вітрових електроустановок до суміжних об'єктів різного функціонального призначення. Чинні нормативні документи не містять конкретних протипожежних вимог або методик розрахунку таких відстаней, що ускладнює процес проектування, оцінки ризиків та забезпечення належного рівня пожежної безпеки для об'єктів даного типу.

У результаті проведеного аналізу основних видів ВЕУ здійснено систематизацію їх технологічних характеристик, що мають безпосередній вплив на рівень пожежної небезпеки та визначення безпечних протипожежних відстаней. Встановлено, що конструктивні особливості, типи обладнання, потужність установок і технічні параметри вітрових турбін впливають на ймовірність виникнення та поширення пожеж, а отже, є ключовими чинниками при обґрунтуванні необхідних протипожежних відстаней до суміжних об'єктів з метою забезпечення належного рівня пожежної безпеки.

Встановлено, що наявні розрахункові та експериментальні методи визначення безпечних протипожежних відстаней ґрунтуються переважно на методології оцінки теплового впливу від одного об'єкта до іншого, без урахування технологічних особливостей конкретних установок та ймовірності їхнього руйнування під час пожежі. Такий підхід обмежує точність оцінки реального рівня небезпеки, оскільки не враховує специфіку конструкцій, матеріалів і технологічних процесів, що може призвести до недооцінки ризиків і встановлення недостатніх протипожежних відстаней.

Метою проведення досліджень є виявлення залежностей, які характеризують небезпеку поширення пожежі на суміжні об'єкти від вітрових електроустановок як наукове підґрунтя для удосконалення методу визначення безпечних протипожежних відстаней до суміжних об'єктів та удосконалення вимог пожежної безпеки.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз пожеж на вітрових електроустановках, що супроводжувалися поширенням вогню, в тому числі на суміжні об'єкти, дослідити найбільш небезпечні аварійні ситуації та визначити недоліки існуючих методів оцінювання небезпеки поширення пожежі від вітрових електроустановок до суміжно розташованих об'єктів.

- здійснити аналіз існуючих теоретичних моделей та методологічних підходів, що описують закономірності поширення пожежі на суміжні об'єкти та визначити критерії, які характеризують небезпеку можливого поширення пожежі.

- розробити та обґрунтувати методіку вогневих експериментальних досліджень розвитку пожежі під час аварійного падіння вітрової електроустановки, дослідити характер фаз горіння та оцінити отримані дані.

- розробити газо-гідродинамічну модель типових видів вітрових електроустановок для проведення комп'ютерного моделювання та дослідження більш широкого спектру закономірностей поширення пожежі на суміжні об'єкти від вітрових електроустановок в разі їх падіння та виливу оливи з корпусу гондоли за визначеними критеріями оцінювання.

- на основі отриманих даних та встановлених закономірностей розробити удосконалений метод оцінювання небезпеки поширення пожежі від вітрових електроустановок на суміжні об'єкти

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ГОРІННЯ ПАЛИВА НА ГОРИЗОНТАЛЬНІЙ ПОВЕРХНІ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СУПУТНИХ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ

2.1. Математичні залежності, що описують енергію випромінювання пожежі для некруглих басейнів

В основі теоретичної моделі виникнення пожежі на горизонтальній поверхні закладається модель одиничного джерела з найпростішою конфігурацією у формі кола чи еліпсу [52]. Сутність такої моделі полягає в тому, що на першому етапі розрахунку припускається, що випромінювання виходить ізотропно, тобто джерела випромінювання випромінюють енергію однаково у всіх напрямках, а саме від одного точкового джерела випромінювання, розташованого в епіцентрі пожежі, як показано на Рисунку 2.1

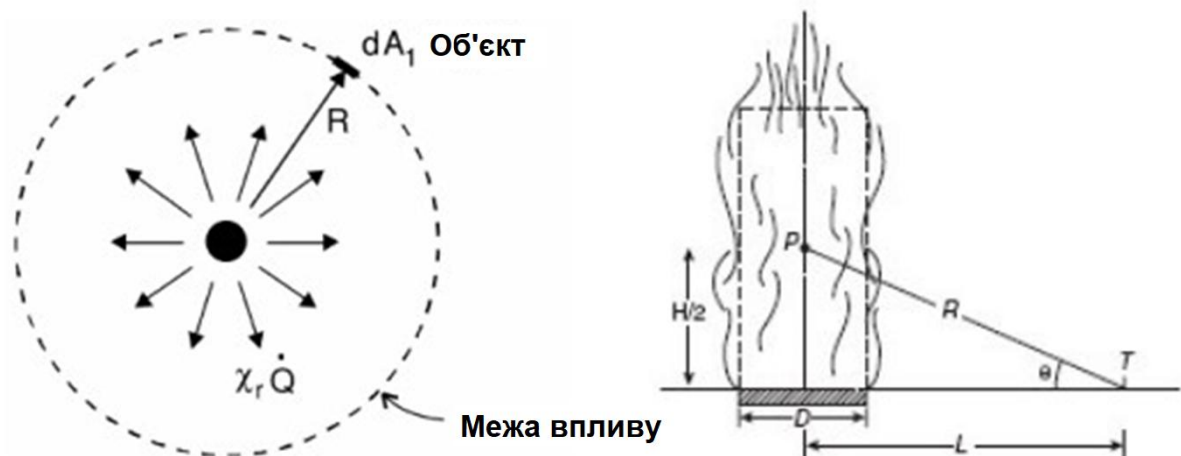


Рисунок 2.1 – Модель ізотропного випромінювання від найпростішої моделі пожежі класу В.

Слід зазначити, що співвідношення сили випромінювання змінюється в залежності від оберненого квадрата відстані R від джерела вогню, що визначається наступним рівнянням:

$$q'' = \frac{Q_r \cos \theta}{4\pi R^2} \quad (2.1)$$

де Q_r - загальна кількість вихідної енергії випромінювання від пожежі (кВт),
 θ - кут між нормаллю джерела пожежі та лінією візування від основи пожежі до місця розташування точкового джерела (радіани),

R - фактична відстань від епіцентру джерела до цілі опромінення (м).

В розрахунках приймається, що теоретичне розташування одиничного джерела енергії знаходиться в центрі пожежі на середині висоти полум'я. Середнє значення висоти полум'я пожежі H , обчислюється за допомогою кореляції Хескестада [53, 54].

$$H = 0.23Q_r^{2/5} - 1.02D \quad (2.2)$$

де Q_r – тепловиділення пожежі (кВт).

Розрахункова відстань R від одиничного джерела вогню до розташування розрахункового об'єкту можна визначити за допомогою теореми Піфагора, як наведено нижче для даної програми [55]:

$$R = \sqrt{L^2 + H_T^2} \quad (2.3)$$

де H_T – значення висоти цілі відносно висоти еквівалентного одиничного джерела пожежі при $H/2$ (м).

За результатом досліджень Шокрі та Бейлера було встановлено, що еквівалентний діаметр можна використовувати для некруглих басейнів, враховуючи, що співвідношення довжини до ширини умовно наближаються до одиниці. Таким чином, ефективний діаметр розраховується за допомогою рівняння 2.4 [56, 57].

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (2.4)$$

де A - площа поверхні поперечного перерізу розрахункової пожежі або її басейну (м).

Таким чином, загальний вихід теплової енергії випромінювання від пожежі можливо обчислити за допомогою рівняння 2.5 нижче.

$$Q_r = X_r Q \quad (2.5)$$

де X_r - радіаційна частка.

За результатом серії експериментальних досліджень було доведено, що радіаційна частка, X_r залежить від типу палива, розміру та конфігурації його полум'я. Його значення може коливатися приблизно від 0,15 для палива з низьким вмістом сажі (як приклад як спирт) до приблизно 0,6 для палива з високим вмістом сажі, такого як вуглеводні, зокрема трансмісійні оливи.

Важливо окремо відмітити Метод Мудана та Кроче, який оцінює потенційне теплове випромінювання від пожеж у басейнах як для полум'я, на яке не діє потенційний вітровий вплив, так і для полум'я, яке піддається впливу вітрового навантаження [58]. Проте в цьому дослідженні описується лише безвітряний стан моделі пожежі класу В. Тепловий потік випромінювання до цілі визначається як:

$$q'' = EF_{12}\tau \quad (2.6)$$

де τ - коефіцієнт розсіювання тепла в атмосфері.

На основі принципів класичних моделей теплового випромінювання цей метод базується на припущенні, що полум'я має циліндричну однорідну форму. Тому однією з необхідних умов є визначення висоти та діаметру полум'я пожежі. Для некругових пожеж ефективний діаметр можна розрахувати за допомогою рівняння 2.4, тоді як для визначення висоти полум'я для цього методу застосовуються інші підходи. Тут використовується кореляція для середньої видимої висоти турбулентного дифузного полум'я, яка запропонована Томасом [59]:

$$\frac{H}{D} = 42 \left(\frac{m''_{\infty}}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0.61} \quad (2.7)$$

де m_{∞}'' - масова швидкість горіння для одиницю площі (кг/м² с),

ρ_a - позначає щільність навколишнього середовища (повітря) (кг/м³),

g - сили тяжіння (9,81 м/с²).

Коефіцієнт радіаційного обміну між вогнем і об'єктом опромінення. Що знаходиться поза басейном полум'я залежить від форми самого полум'я (вважається за замовчуванням циліндричним), відстані між вогнем і об'єктом та відносної орієнтації відносно об'єкту. Максимальний коефіцієнт огляду в точці визначається за допомогою рівнянь 2.8–2.9:

$$F_{12.H} = \frac{\left(\frac{B-1}{S}\right)}{\pi\sqrt{B^2-1}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(B+1)(S-1)}{(B-1)(S+1)}} - \frac{\left(\frac{A-1}{S}\right)}{\pi\sqrt{A^2-1}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(A+1)(S-1)}{(A-1)(S+1)}} \quad (2.8)$$

$$F_{12.V} = \frac{1}{\pi S} \tan^{-1} \left(\frac{h}{\sqrt{S^2-1}} \right) - \frac{h}{\pi S} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(S-1)}{(S+1)}} + \frac{Ah}{\pi S\sqrt{A^2-1}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(A+1)(S-1)}{(A-1)(S+1)}} \quad (2.9)$$

де,

$$A = \frac{h^2+S^2+1}{2S}, B = \frac{1+S^2}{2S}, S = \frac{2L}{D}, h = \frac{2H}{D} \quad (2.10)$$

Максимальний коефіцієнт конфігурації полум'я в точці, $F_{12,max}$, визначається векторною сумою горизонтальних і вертикальних компонентів:

$$F_{12.max} = \sqrt{F_{12.H}^2 + F_{12.V}^2} \quad (2.11)$$

Ефективну випромінювальну потужність, E , дії полум'я можливо визначити за наступною кореляцією [60]:

$$E = E_{max}e^{(-sD)} + E_s(1 - e^{(-sD)}) \quad (2.12)$$

Як показано в рівнянні 2.10 та 2.11, під час проведення розрахункових операцій необхідно врахувати ефект атмосферного поглинання енергії та її розсіювання. Це відбувається у формі коефіцієнта пропускання, τ . Основними компонентами атмосфери, які поглинають теплове випромінювання, є водяна пара (H_2O) і вуглекислий газ (CO_2). Наступна процедура, запропонована Муданом, використовується для розрахунку коефіцієнта пропускання теплової енергії крізь атмосферу. Спочатку обчислюється парціальний тиск водяної пари, p'_w (атм), в атмосфері:

$$p'_w = \frac{RH}{100} \exp\left(14.4114 - \frac{5328}{T_a}\right) \quad (2.13)$$

де RH відповідає значенню відносної вологості повітря (%),

T_a – температура навколишнього середовища.

Далі визначаємо параметр довжини шляху парціального тиску, p_{wl} :

$$p_{wl} = p'_w \left(\frac{T_f}{T_a}\right) \quad (2.14)$$

де l - довжина шляху від поверхні полум'я пожежі до приймаючої поверхні об'єкту (м).

Для температури полум'я та p_{wl} визначають коефіцієнт випромінювання вологості повітря ε_w , використовуючи діаграму коефіцієнта випромінювання, наведену на рисунку 2.2 [54].

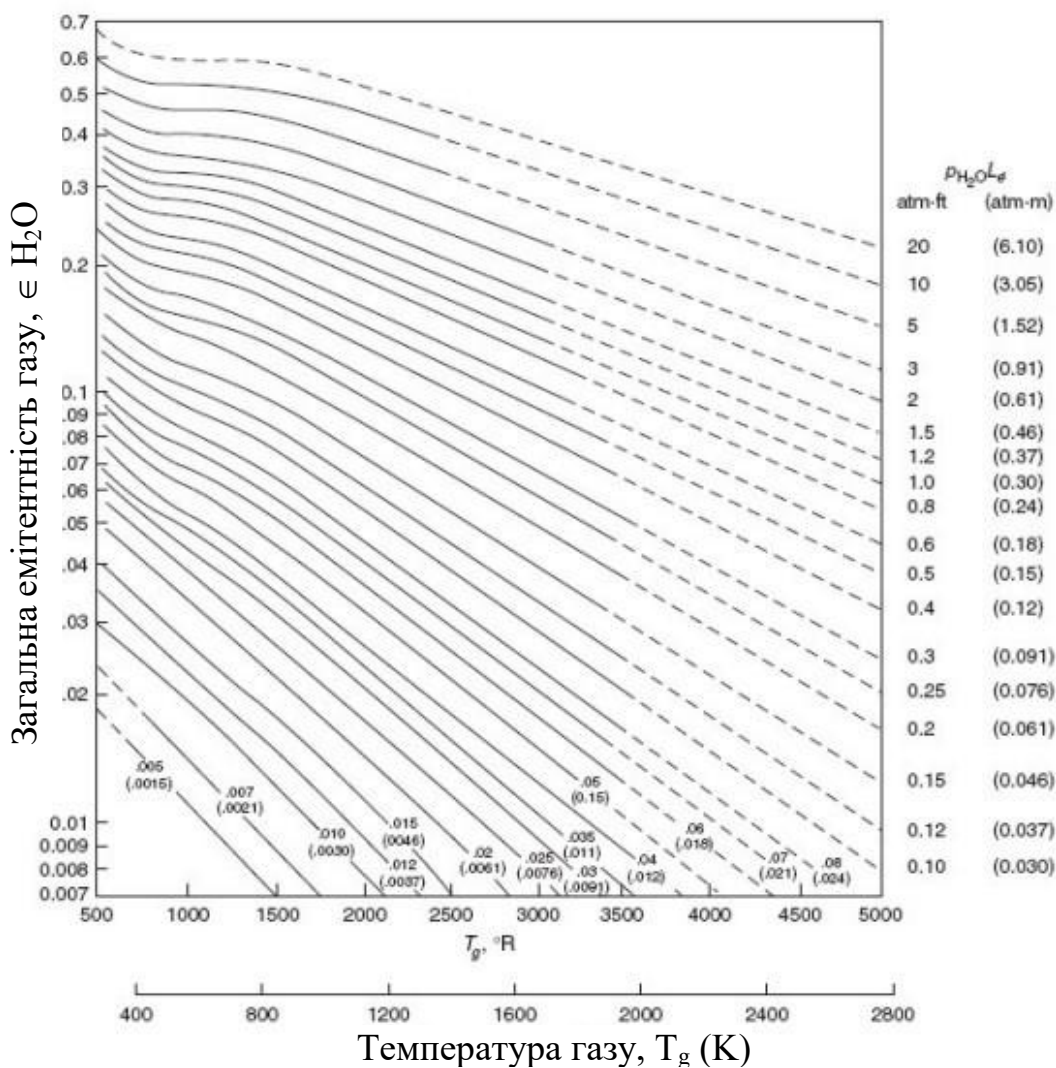


Рисунок 2.2 – Діаграма для визначення коефіцієнту випромінювання в атмосфері в залежності від вологості у навколишньому середовищі.

Коефіцієнт поглинання (розсіювання) в атмосфері насиченої вуглекислим газом розраховується подібним чином. Знаючи, що парціальний тиск CO_2 залишається відносно постійним приблизно на рівні 3×10^{-4} атм [60], і використовуючи [61] коефіцієнт поглинання вуглекислого газу α_w за діаграмою, наведеною на рисунку 2.3.

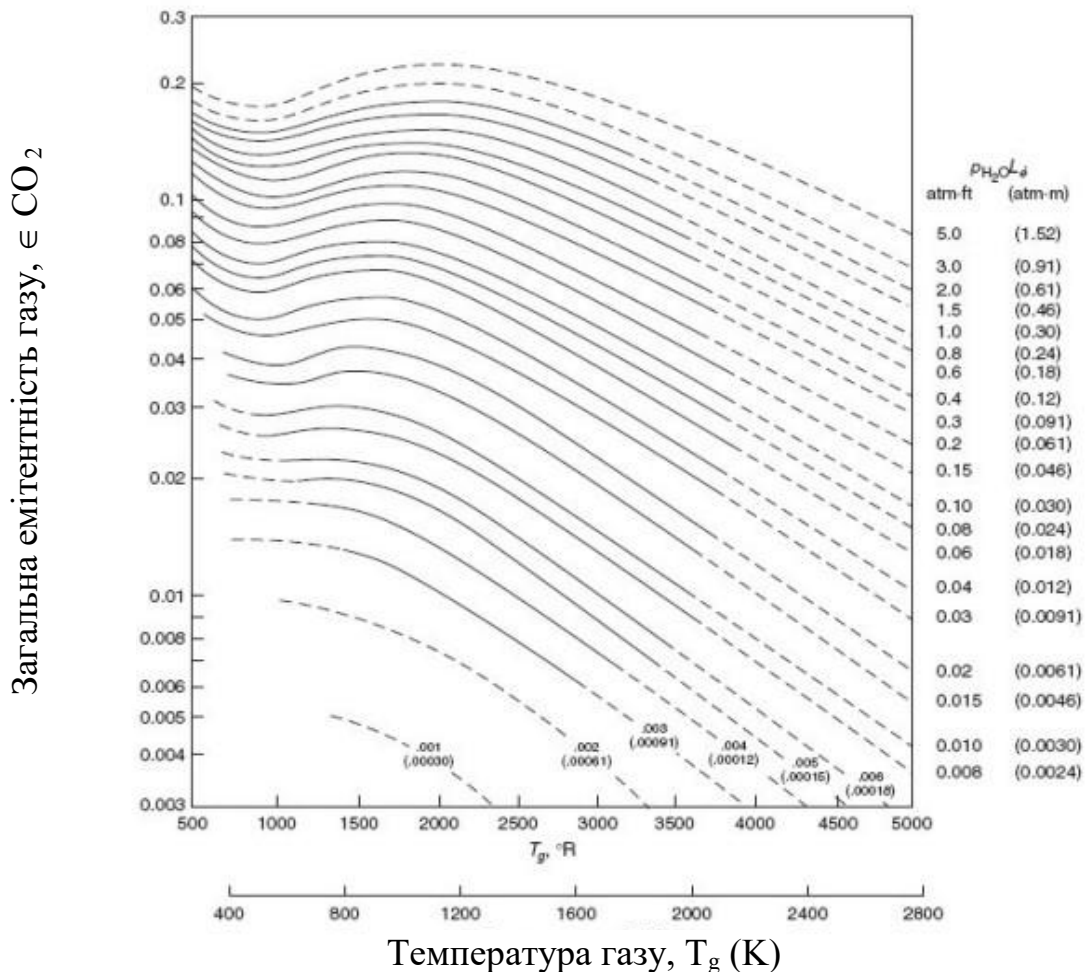


Рисунок 2.3 – Діаграма для визначення коефіцієнту випромінювання в атмосфері в залежності від концентрації вуглекислого газу у навколишньому середовищі.

На основі довідкових даних загальний коефіцієнт випромінювання розраховується за залежністю:

$$\alpha_w = \epsilon_c \left(\frac{T_a}{T_f} \right)^{0.65} \quad (2.15)$$

де ϵ_c - коефіцієнт випромінювання вуглекислого газу.

Таким чином, пропускну здатність середовища можливо визначити за:

$$\tau = 1 - \alpha_w - \alpha_c \quad (2.16)$$

Крім того, метод можна спростити, припустивши, що $\tau = 1$ [62]. Це створює умови, за яких відсутня необхідність користуватися діаграмами. Так само метод можна легко запрограмувати в комп'ютерну модель або електронну таблицю.

Як і в попередніх методах, передбачається, що вогонь має круглу або фактично округлу форму. Порівняння з експериментальними даними дозволяє дійти висновку, що метод Мудана за своєю суттю є досить консервативним для точного прогнозування променистих теплових потоків. Незважаючи на це, при використанні методу для цілей проектування слід застосовувати коефіцієнт безпеки не менше ніж 2.

Окремо слід відзначити метод, який представлений Даяном і Тіеном [63], суть якого також передбачає підхід, при якому полум'я має правильну циліндричну форму. Їх метод обчислює падаючий радіаційний тепловий потік від полум'я до цільового елемента, dA , з одиничним нормальним вектором $\bar{n} = u\bar{i} + v\bar{j} + w\bar{k}$. На рисунку 2.4 наведено схему представленого теплообміну.

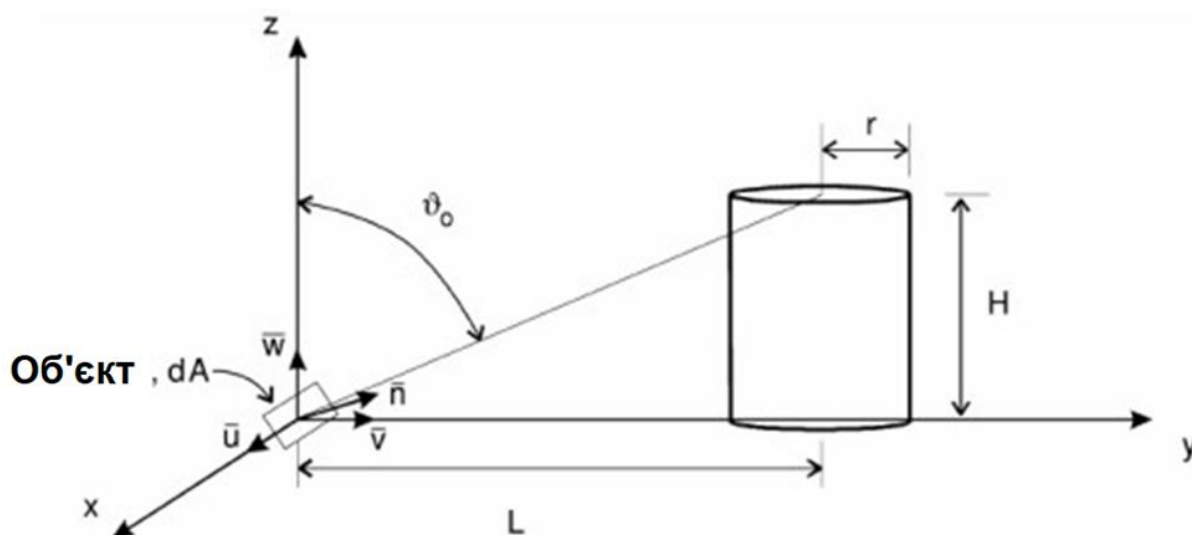


Рисунок 2.4 – Схема обчислення падаючого радіаційного теплового потоку від полум'я до цільового елемента за Даяном і Тіеном.

Тепловий потік до об'єкта визначається як:

$$q'' = \sigma \varepsilon T_f^4 (F_1 + F_2 + F_3) \quad (2.17)$$

де:

$$\varepsilon = 1 - e^{-0.7\mu} \quad (2.18)$$

$$\mu = \frac{2rk}{\sin\beta} \quad (2.19)$$

$$\beta = \frac{\theta_0 + \frac{\pi}{2}}{2} \quad (2.20)$$

$$F_1 = \frac{u}{4\pi} \left(\frac{r}{L}\right)^2 (\pi - 2\theta_0 + \sin 2\theta_0) \quad (2.21)$$

$$F_2 = \frac{v}{4\pi} \left(\frac{r}{L}\right) (\pi - 2\theta_0 + \sin 2\theta_0) \quad (2.21)$$

$$F_3 = \frac{w}{\pi} \left(\frac{r}{L}\right) \cos^2 \theta_0 \quad (2.22)$$

де k - ефективним коефіцієнтом поглинання полум'я (м^{-1}),

β - середнє значення θ (радіани)

θ_0 - являє собою кут між віссю z і лінією візування від цілі до верхньої частини циліндра (радіани), тоді як u , v і w - компоненти \bar{n} у напрямках i , j та k відповідно (див. рис. 2.4).

Цей розрахунковий метод може бути використаний для прогнозування радіаційного теплового потоку до цілей, розташованих як на рівні землі, так і на підвищенні, зокрема на висотній опорі. Для цілей, що знаходяться над рівнем землі, циліндр, який імітує вогонь, необхідно розділити на два циліндри. Наближення, наведені в рівняннях 2.21-2.22, вважаються застосовними для $L/r \geq 3$, де r - радіус пожежі (м). Попередні дослідження виявили, що метод Даяна і Тієна не такий точний, як детальний метод Шокрі і Бейлера при

прогнозуванні фактора форми в напрямку x . Це пояснюється тим, що рівняння 2.21-2.22 вважаються наближеннями точних конфігураційних факторів між циліндром і диференціальним елементом. Однак перевага методу Даяна і Тієна над методом Шокрі і Бейлера полягає у відносній простоті його математичних виразів.

2.2. Математичні підходи під час моделювання пожежі класу В на поверхні ґрунту

Моделювання пожежі на поверхні різних типів ґрунтів (наприклад, трав'яних, степових, низових лісових пожеж, або техногенних загорянь на відкритій місцевості) має низку проблемних питань, які обумовлені складністю фізичних процесів, різноманітністю типів природнього середовища та обмеженням довідкових і експериментальних даних [64-67]. Основні проблемні питання моделювання пожежі на поверхні ґрунту включають:

- нелінійна взаємодія між джерелом вогню, киснем, паливом і ґрунтовою поверхнею;
- вплив на процеси розвитку пожежі температури ґрунту, вологості, вітру, схилів місцевості тощо;
- різний характер поширення пожежі для різних типів пожежної навантаги (суха трава, гілля, сміття, продукти нафтопереробної промисловості).

Окремим аспектом складності моделювання є вплив вітру, що має ключове значення в поширенні вогню по поверхні ґрунтів, при цьому моделювання локальної турбулентності і змін вітрового поля над рельєфом вимагає значних обчислювальних ресурсів. Просторово-часові масштаби моделювання великих натурних моделей досліджуваних об'єктів вимагають або спрощення фізичних моделей (що знижує точність), або застосування потужних обчислювальних ресурсів (наприклад, для використання CFD-моделей).

Одним із найпоширеніших методів моделювання розтікання рідини по горизонтальній поверхні є використання принципу гравітаційного розтікання циліндричного шару рідини [68,69]

Під час формування початкових вихідних даних властивості, які необхідні для здійснення комп'ютерного моделювання базуються на кореляції існуючих експериментальних даних та даних, доступних у довідковій літературі. У дослідженнях моделювання пожежі синтетичних нафтових продуктів передбачається використання важкої нафти 14API з молекулярною масою 515 г/гмоль [70]. Пористість і абсолютна проникність приймається відповідно 0,4, тобто 40% об'єму ґрунту займають пори, а 60% — тверда фаза, а абсолютна проникність на рівні 30000 мілідарсі (мД).

Застосоване значення проникності в 30000 мД є досить високою та характерна для дуже добре проникного ґрунту, наприклад, сухого рихлого піску, гравійного шару або сильно пористого торфу [71]. Термічні властивості, критичні властивості оцінені на основі даних літератури. Крім того, використовується припущення мертвого масла; всі значення K для нафти вважаються рівними нулю.

Фізичні характеристики нафти приймаються на основі кореляцій, запропонованих та обґрунтованих Кесслером і Лі [72]. Коли молекулярна маса та питома вага відомі, оцінюють критичний тиск, критичну температуру, ацентричний фактор (відхилення реального стану газу від ідеального) і температуру кипіння. Теплопровідність для різних компонентів нафти оцінюється на основі наступної кореляції, наведеної Cragoe [73].

$$\lambda_o(Btu/D - ft - ^\circ F) = 1.62[1 - 3 \times 10^{-4}(T(^{\circ}F) - 32)] \quad (2.23)$$

Для масла 14 API з відповідним перетворенням одиниць для моделювання наведений вище вираз еквівалентний [73]:

$$\lambda_o(J/min - cm - ^\circ C) = 0.0711864 - 0.00003844 \times T(^{\circ}C) \quad (2.24)$$

В'язкість нафти приводиться в значеннях згідно із довідковими даними наведеними Aziz [74]. Теплопровідність води визначається на основі виразу [75]:

$$\lambda_w(J/cm - min - ^\circ C) = 0.3414 \times 0.0011 \times T(^{\circ}C) - 4 \times 10^{-6} \times T^2 + 10^{-9} \times T^3 \quad (2.25)$$

Теплопровідність газової фази визначається на основі наступного співвідношення [76, 77]

$$\lambda_g(J/cm - min - ^\circ C) = 0.0142 + 5 \times 10^{-5}T(^{\circ}C) - 2 \times 10^{-8}T^2 + 3 \times 10^{-12}T^3 \quad (2.26)$$

Вважається, що середовище газової фази складається з повітря, а вираз отримано шляхом адаптації даних про теплопровідність повітря, наданих базою даних теплофізичних властивостей речовин [78]. Теплопровідність піску становить 0,1578 Вт/(м·°C) [79]. Ефективна теплопровідність середовища моделювання за замовчуванням в самій комп'ютерній моделі оцінюється з об'ємним показником фази [80]. Тому теплопровідність породи оцінюється як 0,2528 Вт/(м·°C), так що при 25 °C те саме значення (0,1578 Вт/(м·°C)) досягається після усереднення об'єму насиченого повітрям піску. Теплопровідність нержавіючої сталі визначається на основі наступного виразу [76, 77]:

$$\lambda_{ss316}(J/cm - min - ^\circ C) = 7.7661 + 0.0095T(^{\circ}C) - 2 \times 10^{-6}T^2 \quad (2.27)$$

Вираз отримано на основі довідкових даних з кривих, наданих базою даних теплофізичних властивостей речовини [78].

Теплопровідність мінералу доломіту становить 3,31 Вт/(м·°C) [81]. Дітц [82] навів модель теплопровідності у сформованих шарах. Ефективна електропровідність оцінюється на основі наступного співвідношення:

$$\lambda_{effective} = 1.14 \sqrt{\frac{\lambda_p}{\lambda_f}} \frac{BesselK_0\left(\sqrt{\frac{40\lambda_f}{\lambda_p}}\right)}{BesselK_1\left(\sqrt{\frac{40\lambda_f}{\lambda_p}}\right)} \quad (2.28)$$

де λ_p – одна частка матеріалу, λ_f – теплопровідність води.

Якщо припустити, що пористе середовище насичене повітрям, то ефективна теплопровідність обчислюється як $0,134825 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$. Ефективну теплопровідність визначаємо за допомогою об'ємного усереднення. Таким чином, вхідні значення для становить $0,2145 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$. Теплопровідність закоксованого ґрунту визначаємо за таким виразом [76, 77].

$$\lambda_{\text{coke}}(\text{J/cm} - \text{min} - \text{°C}) = 1.1006 + 0.0015T(\text{°C}) - 6 \times 10^{-7}T^2 \quad (2.29)$$

Теплоємність піску визначається на основі значень SiO_2 з коефіцієнтів Гленна для розрахунку термодинамічних властивостей окремих видів силікатних матеріалів [83].

$$c_p \left(\frac{\text{J}}{\text{cm}^3 \cdot \text{°C}} \right) = 1.6328 + 0.001(T(\text{°C}) + 273.15) \quad (2.30)$$

Стисливість рідини приймається рівною $7,25\text{E-}07 \text{ 1/кПа}$ [74]. Коефіцієнт теплового розширення приймається рівним $0,00069242 \text{ 1/°C}$ [74]. Вирази відносної проникності для системи вода та нафти приймаємо за [74]:

$$k_{rw} = k_{rwro} \left(\frac{S_w - S_{wir}}{1 - S_{orw} - S_{wir}} \right)^{2.5} \quad (2.31)$$

$$k_{row} = k_{roiw} \left(\frac{1 - S_{orw} - S_w}{1 - S_{orw} - S_{iw}} \right)^2 \quad (2.32)$$

Для газойльної системи (тип середовища вуглеводнів, що містить газ і нафту (газойль), або системи, де ці фази взаємодіють) визначають за [74]:

$$k_{rog} = k_{roiw} \left(\frac{1 - S_{iw} - S_{org} - S_g}{1 - S_{iw} - S_{org}} \right)^2 \quad (2.33)$$

$$k_{rg} = k_{rgro} \left(\frac{S_g - S_{gc}}{1 - S_{iw} - S_{gc}} \right)^{1.5} \quad (2.34)$$

де S_{wir} (незнижувана водонасиченість) = 0,45, S_{iw} (інтерстиціальна водонасиченість) = 0,45, S_{org} (залишкова нафтонасичення водою/нафтою) = 0,15, S_{org} (газово-нафтова залишкова нафтонасичення) = 0,10, S_{gc} (критична газонасиченість) = 0,06, k_{roiw} (відносна проникність нафти при інтерстиціальна водонасиченість) = 0,4, k_{rwo} (відносна водопроникність при залишковій нафтонасиченості, система вода/нафта) = 0,1, k_{rgo} (відносна проникність газу при залишковій нафтонасиченні, система газ/нафта) = 0,2, Немає впливу температури чи гістерезису передбачається. Трифазна відносна проникність розраховується на основі модифікованої моделі Stones II [84].

2.3 Розробка спрощеної математичної моделі розвитку пожежі за сценарієм «руйнування–пожежа» для вітрових електроустановок

Важливим аспектом серед існуючих залежностей, які описують поширення пожежі на поверхні ґрунту з врахуванням типу палива, вітрових навантажень, місцевості та форми початкового периметру пожежі відносно топографії (геодезична та нормальна кривизни) є дотримання експериментального порядку збіжності числової схеми з реальною моделлю поширення пожежі. Більшість математичних моделей закладають два основних принципи моделювання процесів поширення вогню, а саме квазіфізичний та емпіричний [85]. Як правило дво- та тривимірні моделі ґрунтуються на формулюванні рівнянь руху для гнучких потоків. Процеси горіння розглядаються з використанням стехіометричного співвідношення лише для газової фази, що виникає внаслідок випаровування та піролізу. Низькошвидкісний, термічно обумовлений потік з врахуванням процесів поширення диму та перенесення тепла від полум'я пожежі отримується як чисельне розв'язання системи рівнянь Нав'є-Стокса.

Симулятор розроблений грецькою компанією Calchas [86] враховує нахил місцевості, тип рослинності та умови навколишнього середовища. Еволюція ґрунтується на варіації алгоритму Dijkstra та нечіткій/нейронній системі для оцінки сукупного впливу зазначених факторів. В результаті просторова крива розвивається по нормалі відносно розрахункового простору.

В роботах [85-89] моделі поширення низинних пожеж на відкритій місцевості та зокрема периметр пожежі представлені поверхневою кривою, хоча чисельно він трансформується як проєктована плоска крива периметру. Еволюція поверхневої кривої керується емпіричною математичною моделлю, яка враховує змінну швидкості розливу палива, швидкість і напрямок вітру, топографічний нахил ґрунтів та форму периметра пожежі щодо топографії (геодезичні та нормальні криві).

Підхід Лагранджа для представлення розвиненої 3-D поверхневої кривої, що представляє периметр пожежі описується рівнянням [90] :

$$\Gamma = \{x(u); u \in [0,1], x(0) = x(1)\}, \text{ де } x(u) = (x(u), y(u)) \in R^2 \quad (2.35)$$

Дана залежність описує проєкцію вектору положення кривої Γ для параметра u .

У дискретизованій формі її можливо представити схематично, як показано на рис. 2.5.

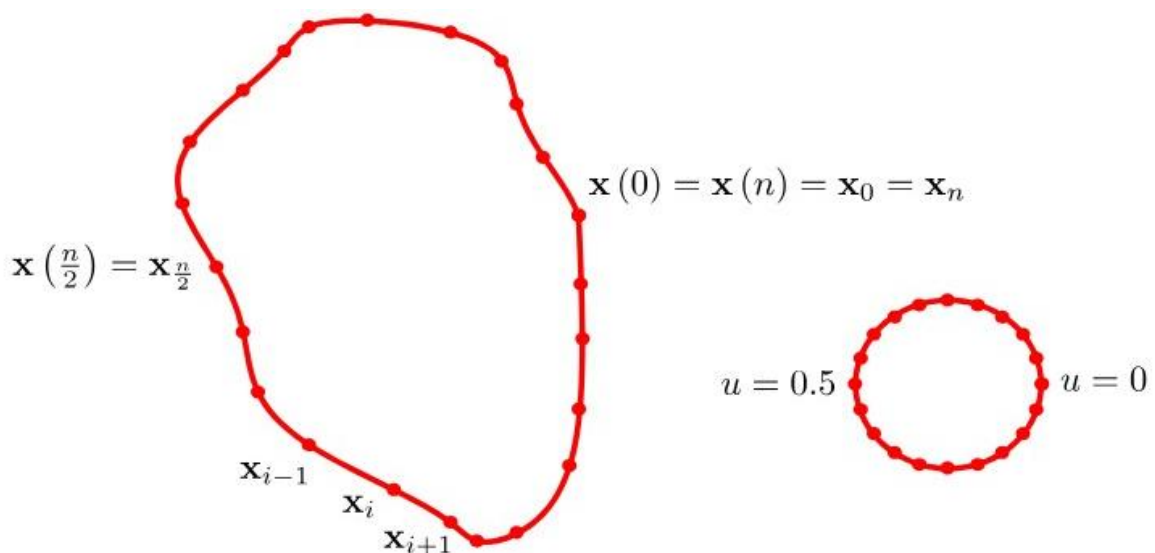


Рисунок 2.5 – Приклад дискретизації плоскої кривої Γ .

Авторами [85] прийнято, що крива вогнища пожежі буде розширюватися через вплив зовнішніх факторів, а саме припущено, що рух кривої відбувається в

напрямку зовнішньої нормалі. Якщо крива Γ параметризована в сторону центру осередку пожежі, унікальне визначення одиничних векторів дотичної T і зовнішньої одиничної нормалі N до плоскої кривої Γ можна описати наступною залежністю [85]:

$$T = x_s, N = x_s^\perp, i(T \wedge N) = -1, \text{ де } x_s = \frac{\partial x}{\partial s} \quad (2.36)$$

де $(T \wedge N)$ позначає визначник матриці зі стовпцями T і N , s -параметризація кривої Γ за довжиною дуги вогнища пожежі та виражається [85]:

$$ds = g du, \text{ де } g = |x_u| = \frac{\partial x}{\partial u} > 0. \text{ Якщо } T = (x_s, y_s), \text{ то } N = (y_s, -x_s).$$

Як правило в більшості реальних випадків низових пожеж на поверхні ґрунту вони не виникають на рівнинній місцевості. Тому доцільно визначати поверхню M , яка представляє реальну локальну топографію Землі, що задається, наприклад, цифровою моделлю рельєфу. Приймається припущення, що M — двовимірна поверхня в R^3 , $M = \{(x, y, \varphi(x, y)) \in R^3, (x, y) \in \Omega\}$, представлена графіком функції $\varphi: \Omega \subset R^2 \rightarrow R$, визначеної на області $\Omega \subset R^2$. Таким чином крива G , параметризована $u \in [0, 1]$, $(x(0), y(0), z(0)) = (x(1), y(1), z(1))$, буде замкненою поверхневою кривою зони пожежі на M , яка представляє периметр пожежі на поверхні M . Позначимо через p параметризацію кривої G за довжиною дуги: $dp = G du$, де $G = |G_u| > 0$. Крім того, ми припускаємо, що співвідношення між плоскою кривою Γ і поверхневою кривою $G \in G = \{(x(u), y(u), z(u) = \varphi(x(u), y(u))) \in R^3, (x(u), y(u)) \in \Gamma\}$, що означає, що крива Γ є вертикальною проєкцією поверхневої кривої G . Візуалізація описаної математичної моделі наведено на рисунку 2.6.

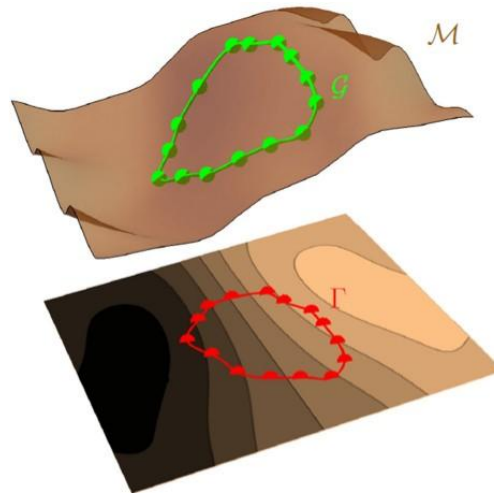


Рисунок 2.6 – Поверхнева крива G на поверхні землі M і плоска крива Γ як вертикальна проєкція G на горизонтальну площину.

Таким чином, можливо визначити залежність для одиничних векторів поширення вогню дотичної T і нормалі N у дотичній площині до поверхні M . Для одиничного вектора дотичної T запропоновано застосувати вираз [85]:

$$T = \frac{(T, \nabla \varphi \cdot T)}{1 + (\nabla \varphi \cdot T)^2} \quad (2.37)$$

Варто відзначити, що тут і в подальших позначеннях ми позначаємо 3-D вектор як (\mathbf{a}, \mathbf{b}) , де $\mathbf{a} \in \mathbb{R}^2$ і $\mathbf{b} \in \mathbb{R}$. Вектор N ми знаходимо як векторний добуток одиничного дотичного вектора T і спрямованого вгору одиничного вектора нормалі N_M до поверхні M . Вектор N_M задається як векторний добуток двох векторів з дотичної площини до поверхні M , наприклад, $v_1 = (1, 0, \varphi_x)$ і $v_2 = (0, 1, \varphi_y)$, який потім нормалізується, і ми отримуємо:

$$N_M = \frac{(-\varphi_x, -\varphi_y, 1)}{\sqrt{1 + (\nabla \varphi \cdot T)^2}} = \frac{(-\nabla \varphi, 1)}{\sqrt{1 + |\nabla \varphi|^2}} \quad (2.38)$$

Тоді зовнішній одиничний вектор нормалі N можливо представити наступним чином:

$$N = \frac{(N+(\nabla\varphi)^\perp(\nabla\varphi\cdot T), \nabla\varphi\cdot N)}{\sqrt{(1+|\nabla\varphi|^2)(1+(\nabla\varphi\cdot T)^2)}} \quad (2.39)$$

де $(\nabla\varphi)^\perp = (\varphi_y, -\varphi_x)$. Оскільки $(\nabla\varphi)^\perp = (\nabla\varphi\cdot T)N - (\nabla\varphi\cdot N)T$, зовнішній одиничний вектор нормалі N можливо представити [85]:

$$N = \frac{((1+(\nabla\varphi\cdot T)^2)N - (\nabla\varphi\cdot T)(\nabla\varphi\cdot N)T, \nabla\varphi\cdot N)}{\sqrt{(1+|\nabla\varphi|^2)(1+(\nabla\varphi\cdot T)^2)}} \quad (2.40)$$

Для поверхневої кривої G можливо знайти її вектор кривизни K як другу похідну G за параметризацією довжиною дуги p [85]:

$$K = G_{pp} = T_p = \frac{g}{G} T_s = \left(\frac{x_{ss}(1+\varphi_s^2) - x_s\varphi_s\varphi_{ss}, \varphi_{ss}(1+\varphi_s^2) - \varphi_s^2\varphi_{ss}}{(1+\varphi_s^2)^2} \right) \quad (2.41)$$

Оскільки $\varphi_{ss} = (\varphi_{xx}x_sx_s + \varphi_{xy}x_sy_s + \varphi_x x_{ss} + \varphi_{yx}y_sx_s + \varphi_{yy}y_sy_s + \varphi_y y_{ss})$ та $-kN = x_{ss}$, де k – кривина плоскої кривої, ми отримуємо $\varphi_{ss} = T^T H(\varphi) T - k(\nabla\varphi\cdot N)$, де $H(\varphi)$ є квадратною матрицею з частинними похідними другого порядку функції рельєфу φ , і ми отримуємо кінцеве рівняння для вектора кривизни K :

$$K = \left(\frac{-kN(1+(\nabla\varphi\cdot T)^2) - T(\nabla\varphi\cdot T)T^T H(\varphi)T - k(\nabla\varphi\cdot N)}{(1+(\nabla\varphi\cdot T)^2)^2}, \frac{T^T H(\varphi)T - k(\nabla\varphi\cdot N)}{(1+(\nabla\varphi\cdot T)^2)^2} \right) \quad (2.42)$$

За результатом аналізу математичних дій приймаємо, що $K = K_g(-N) + K_n N_M$, де K_g — геодезична кривина, а K_n — нормальна кривина. Розподіл кривини поширення фронту пожежі K на K_g і K_n (див. Рис. 3) є важливим для симуляції поширення поверхневого вогню. Якщо ми знаємо кривизну в дотичній площині, K_g , ми знаємо, як форма периметра пожежі впливає на локальну нормальну швидкість її поширення. Друга частина рівняння, K_n , виражає вплив нерівної поверхні ділянки землі на локальну нормальну швидкість. Оскільки геодезична кривина є проєкцією K на внутрішній одиничний вектор нормалі $-N$, отримуємо [85]:

$$K_g = k \frac{\sqrt{1+|\nabla\phi|^2}}{(1+(\nabla\phi \cdot \mathbf{T})^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{(\nabla\phi \cdot \mathbf{N})\mathbf{T}^T \mathbf{H}(\phi)\mathbf{T}}{\sqrt{1+|\nabla\phi|^2}(1+(\nabla\phi \cdot \mathbf{T})^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2.43)$$

Нормальна кривизна є компонентою K у напрямку одиничного вектору нормалі до поверхні \mathbf{N}_M , спрямованого вгору:

$$K_n = \frac{\mathbf{T}^T \mathbf{H}(\phi)\mathbf{T}}{(1+(\nabla\phi \cdot \mathbf{T})^2)\sqrt{1+|\nabla\phi|^2}} \quad (2.44)$$

Візуалізація представлених залежностей відображено на рисунку 3.

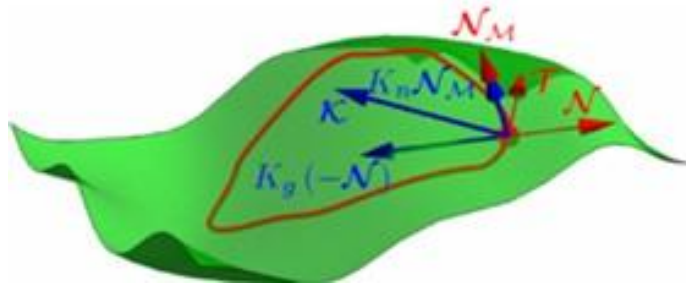


Рисунок 2.7 – Розділення кривини K на геодезичну (K_g) та нормальну (K_n) кривини при моделюванні розвитку периметра пожежі.

Представлена математичну модель поширення низових пожеж, заснована на методі Лагранжа дозволяє описати криву на поверхні ґрунту, що представляє периметр пожежі та її проекцію на двовимірну плоску криву, а також розглянути вплив самої форми периметра поверхні пожежі через геодезичну та нормальну кривизну. Дослідження [85] відзначають, що представлені числові залежності демонструють здатність реконструювати реальний периметр пожежі з незначною похибкою в межах 10%.

Аналіз існуючих підходів до визначення протипожежних відстаней показав, що більшість сучасних методик базуються на класичних моделях басейнових пожеж, у межах яких джерело горіння приймається стаціонарним та симетричним відносно геометричного центру розливу горючої рідини. Такі підходи є

ефективними для стандартних резервуарних систем, проте вони не враховують специфіку аварійних процесів, характерних для об'єктів вітроенергетики. Для ВЕУ характерним є виникнення комбінованих аварійних сценаріїв, що включають механічне руйнування конструкції вежі, падіння окремих елементів установки, розлив мастильних матеріалів та подальше займання горючої рідини. У реальних умовах розвитку аварії сценарії «руйнування–пожежа» та «пожежа–руйнування» супроводжуються зміною положення джерела пожежі, деформацією форми басейну розливу, а також суттєвим впливом вітрового навантаження на процес поширення теплового поля. Це призводить до формування асиметричної температурної зони, параметри якої можуть значно перевищувати прогнозовані значення, отримані на основі традиційних моделей круглих басейнових пожеж.

З метою врахування зазначених факторів запропоновано спрощену математичну модель розвитку пожежі для вітрових електроустановок, яка дозволяє оцінювати просторовий розподіл теплового випромінювання з урахуванням:

- некруглої форми басейну розливу;
- впливу швидкості вітру;
- зміщення центру пожежі внаслідок руйнування конструкції;
- зміни геометричних параметрів теплового поля.

Для спрощення математичного опису прийнято, що після руйнування вежі формується еліптичний басейн розливу горючої рідини. Геометрична форма розливу описується рівнянням:

$$x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1, \quad (2.45)$$

де a – велика піввісь еліпса; b – мала піввісь еліпса.

Урахування впливу вітру здійснюється через зміну співвідношення між півосями еліпса. Зі збільшенням швидкості вітру басейн розливу витягується у напрямку повітряного потоку, що описується залежністю:

$$a = b(1 + k_w V_w), \quad (2.46)$$

де V_w – швидкість вітру, м/с; k_w – коефіцієнт деформації зони розливу під дією вітру.

Площа пожежі для еліптичного басейну визначається за виразом:

$$A_f = \pi a b. \quad (2.47)$$

Інтенсивність теплового випромінювання пожежі залежить від швидкості вигорання палива (оливи), площі пожежі та частки енергії, що передається у вигляді променистого теплообміну. Повна тепла потужність пожежі визначається співвідношенням:

$$Q = \eta H_c \dot{m} A_f, \quad (2.48)$$

де η – коефіцієнт випромінювання; H_c – теплота згорання рідини; \dot{m} – масова швидкість вигорання.

Для оцінювання теплового впливу на навколишні об'єкти використано модель точкового джерела випромінювання з урахуванням анізотропії теплового поля. Густина теплового потоку у довільній точці простору визначається виразом:

$$q(r, \theta) = \chi Q / (4\pi r^2) \cdot \varphi(\theta, V_w), \quad (2.49)$$

де χ – коефіцієнт атмосферного ослаблення; r – відстань до джерела пожежі; $\varphi(\theta, V_w)$ – функція, що враховує вплив напрямку та швидкості вітру.

Для спрощення інженерних розрахунків функцію анізотропії запропоновано визначати за залежністю:

$$\varphi(\theta, V_w) = 1 + k\theta V_w \cos\theta, \quad (2.50)$$

де $k\theta$ – емпіричний коефіцієнт впливу вітрового навантаження.

Запропонована залежність дозволяє врахувати витягування теплового факела у напрямку вітру та збільшення протяжності небезпечної температурної зони. Особливістю сценарію «руйнування–пожежа» є зміщення центру горіння внаслідок падіння конструктивних елементів вежі. У моделі прийнято, що положення нового центру пожежі визначається координатами:

$$x_c = L \cos \alpha \text{ та } y_c = L \sin \alpha, \quad (2.51)$$

де L – довжина зруйнованої секції; α – кут падіння конструкції.

Тоді ефективна відстань від джерела пожежі до об'єкта захисту визначається як:

$$r_e = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}. \quad (2.52)$$

Межа небезпечної температурної зони визначається умовою досягнення критичного значення теплового потоку або температури:

$$q(r_e, \theta) \geq q_{cr}, \text{ або} \quad (2.53)$$

$$T(r_e) \geq 250 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (2.54)$$

На рисунку 2.8 наведено спрощену математичну модель аварійного сценарію «руйнування–пожежа» / «пожежа–руйнування» для вітрових електроустановок (ВЕУ).

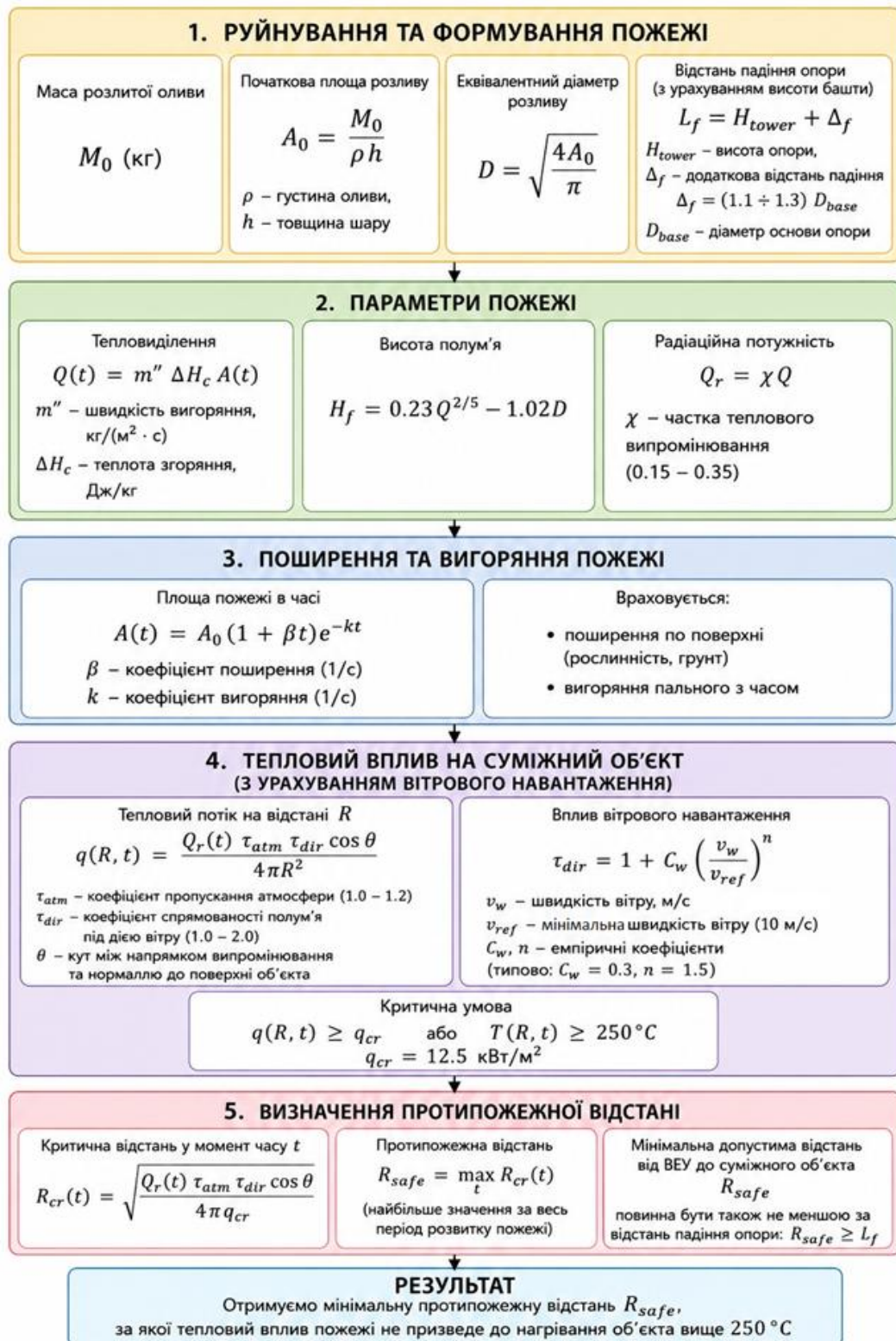


Рисунок 2.8 – Математична модель аварійного сценарію «руйнування–пожежа» / «пожежа–руйнування» для ВЕУ.

Запропонована модель дозволяє врахувати збільшення небезпечної температурної зони за рахунок впливу вітру та зміщення джерела горіння.

Проведений аналіз показує, що за швидкості вітру понад 10 м/с радіус зони температур вище 250 °С може перевищувати геометричний радіус розливу горючої рідини до 45 %, що свідчить про необхідність уточнення існуючих нормативних протипожежних відстаней для об'єктів вітроенергетики.

Практична цінність запропонованої математичної моделі полягає у можливості її використання для прогнозування параметрів аварійних пожеж на вітрових електроустановках, оцінювання теплового впливу на суміжне обладнання та визначення мінімально допустимих безпечних відстаней між елементами енергетичної інфраструктури. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальшого розвитку чисельних моделей поширення пожежі та удосконалення нормативної бази у сфері пожежної безпеки об'єктів відновлюваної енергетики.

Висновки до розділу II

1. За результатами аналізу математичних залежностей, що описують енергію випромінювання пожежі для некруглих басейнів, визначено основні фізичні механізми та математичні алгоритми, які застосовуються при моделюванні процесів поширення пожежі. Встановлено, що такі залежності враховують геометричні особливості осередку горіння, розподіл температурного поля та інтенсивність теплового випромінювання, що дозволяє більш точно прогнозувати динаміку розвитку пожежі та оцінювати потенційні зони небезпечного впливу.

2. За результатами аналізу існуючих математичних підходів під час моделювання пожеж класу В на поверхні ґрунту встановлено, що під час розрахунків важливо врахувати потенційний вплив навколишнього середовища, зокрема метеорологічних умов, рельєфу місцевості та характеристик ґрунту, в тому числі його щільності. Даний підхід дозволяє підвищити достовірність прогнозування процесів горіння на поверхні і поширення пожежі, оскільки зовнішні фактори суттєво впливають на інтенсивність теплового

випромінювання, швидкість поширення фронту полум'я та масштаби утворення пожежо-небезпечних зон.

3. Врахування топографічних параметрів місцевості під час створення математичних і комп'ютерних моделей горіння пожеж на поверхні землі внаслідок падіння та розливу горючих матеріалів є важливим елементом підвищення точності прогнозування розвитку пожежі. Використання підходу Лагранжа для представлення розвиненої тривимірної поверхневої кривої, що описує периметр пожежі, дозволяє динамічно відображати зміну форми та меж осередку горіння залежно від рельєфу місцевості. Такий підхід забезпечує більш реалістичне моделювання процесів поширення вогню, враховуючи взаємодію між топографією, напрямом стікання палива та інтенсивністю горіння, що є необхідним для точного визначення зон теплового впливу та розроблення ефективних заходів протидії пожежам.

4. Під час реалізації оцінювання процесів поширення пожежі за найбільш несприятливим аварійним сценарієм «руйнування-пожежа» запропоновано використовувати такі значення критеріїв, як тривалість горіння, площа початкового та кінцевого осередку пожежі, температуру в зоні осередку пожежі та динаміку їх зміни. В якості критерію, який характеризує безпеку поширення пожежі на суміжний об'єкт прийнято значення температури у 250 °C, що відповідає температурі деформування будівельного матеріалу з найменшим температурним опором, а саме синтетичні полімери (пластмаси, гума, нейлон).

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМИ-МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ВІД ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК ТА ПРОВЕДЕННЯ НАТУРНИХ ВОГНЕВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Формування програми-методики досліджень поширення пожежі між об'єктами в результаті аварійної ситуації

Розроблення програми експериментальних досліджень поширення пожежі між об'єктами в результаті аварійної ситуації на одному із них має ключове значення для оцінювання рівня забезпечення безпеки людей (персоналу), збереження матеріальних цінностей та мінімізації екологічних і економічних наслідків. В розроблення програми закладаються наступні принципи:

- потенційна мінімізація наслідків аварії, що в свою чергу впливатиме на визначення ефективних методів локалізації та гасіння пожежі;
- розробка заходів протипожежного захисту та зокрема визначення ефективних та водночас раціональних значень протипожежних відстаней між об'єктами;
- оцінка потенційних ризиків, які передбачають визначення критичних пожежонебезпечних зон, оцінювання небезпеки для населення та персоналу, який може обслуговувати ВЕУ, в тому числі знаходитися в середині їх корпусу;
- оптимізація дій, заходів та ресурсів пожежно-рятувальної служби, а також безпека рятувальних підрозділів під час виконання дій за призначенням.

Існуючі підходи визначення протипожежних відстаней не враховують можливість аварійного сценарію, що супроводжується руйнуванням конструкції споруди, зокрема для вітрових електроустановок, який полягає в можливості руйнування її вежі за сценарієм «руйнування-пожежа» або «пожежа-руйнування» [91].

За результатом аналізу пожеж та їх наслідків, які відбувалися на ВЕУ визначено найбільш несприятливі варіанти її виникнення та розвитку [92]. В основі сценарію пожежі при механічному пошкодженні та/або падінні ВЕУ закладається наступний найбільш небезпечний сценарій: механічна несправність

ВЕУ, яка призводить до некерованого збільшення частоти обертів, вібрації корпусу та коливання опори гондоли з подальшим її руйнуванням та падінням. Падіння опори гондоли відбувається в бік суміжного об'єкту, при цьому корпус гондоли розламується при падінні на землю, а олива розтікається та загоряється. Даний сценарій найбільш небезпечної аварії на ВЕУ в частині пожежної небезпеки матиме в подальшому скорочення назви «руйнування-пожежа».

Окрім цього враховується, що висота вежі, діаметр ротора та кількість оливи в механізмах вітрогенерувального обладнання є взаємопов'язаними чинниками, а саме – чим вище висота вежі, тим більша кількість оливи в корпусі гондоли, а відповідно і більше пожежної навантаги знаходиться в корпусі ВЕУ [20]. Таким чином, в основі розроблюваної програми-методики визначення умов безпеки та не поширення пожежі на суміжний об'єкт закладаються завдання: дослідити залежності формування осередку пожежі; можливість її поширення на суміжний об'єкт згідно із визначеними критеріями небезпеки.

Серед об'єктів, які входять до програми досліджень є: імітаційна модель вітрової електроустановки з оливо наповненим корпусом, площадка для проведення експериментальних досліджень (випробувальний вогневий майданчик) з маркерами ідентифікації геометричних розмірів площі розливу палива та полум'я пожежі; вимірювальна техніка, мірні ємності та обладнання для проведення фото та відео зйомок. В якості початкового осередку пожежі застосовується макетне вогнище пожежі класу В.

Дані методичні підходи можливо застосовувати для експериментальних досліджень оцінки безпечних протипожежних відстаней від вітрових електроустановок до суміжних об'єктів, в тому числі із зовнішніми огорожувальними конструкціями, виконаними з горючим облицюванням.

Передбачається, що вогневий майданчик розмірами 20×20 м має піщано-грунтову горизонтальну поверхню очищену від сухого трав'яного покриву із земляним обвалуванням по периметру висотою 0,1 м. Ухил випробувального вогневого майданчику не перевищує 0,05 м/м. Коефіцієнт просочування горючої рідини в ґрунт не застосовується, для імітації найгірших наслідків аварійної

ситуації з найбільшою кількістю палива. На поверхні землі вогневого майданчику маркером виконується розмітка прямокутними комірками розміром $0,5 \times 0,5$ м кожна для забезпечення візуальної ідентифікації зони пожежі і можливості визначення її площі. На рисунку 3.1 наведено схематичне зображення вогневого майданчику та його геометричні параметри.

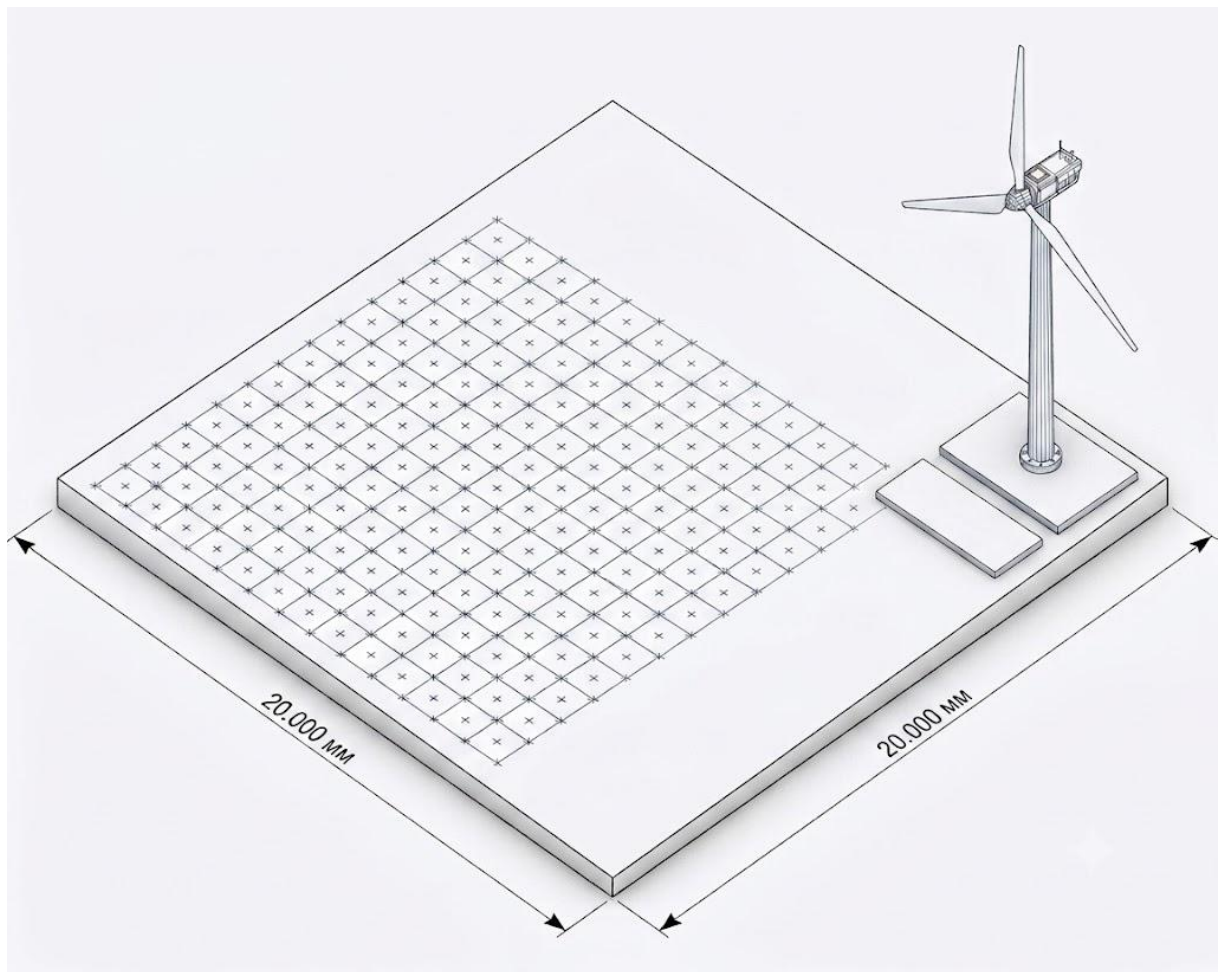


Рисунок 3.1 – Схема вогневого майданчику та його геометричні параметри.

На рисунку 3.2 наведено загальний вигляд вогневого майданчику та елементи, що використовуються в програмі експериментальних досліджень.



Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд випробувального вогневого майданчику, де: 1- вітрова електроустановка; 2 – вежа яка тримає гондолу; 3 – допоміжна споруда операторів досліджень; 4 – межа вогневого майданчику; 5 – маркерна сітка для фіксації площі розливу оливи.

Вітрова електроустановка складається з вежі, гондולי (механічна частина установки, що генерує електроенергію за рахунок обертання ротора) та лопатей, які виготовляються з композитних матеріалів, таких як склопластик або вуглепластик, які мають високу міцність, але можуть сприяти поширенню вогню у разі займання установки [93]. Три лопаті вітрової електроустановки мають довжину 1,3 м ($\pm 0,01$ м) та ширину 0,25 м ($\pm 0,01$ м), які відповідають параметром ВЕУ потужністю 2 кВт [94]. Вежа установки виготовлена із сталеві труби діаметром 75 мм та довжиною 10 м ($\pm 0,05$ м). В нижній частині вежі встановлено направляючу скобу, яка є елементом безпеки та контролює напрямок падіння вежі установки, а під час підготовки до вогневих досліджень є одним із елементів її фіксації. ВЕУ встановлюється в зоні допоміжної споруди для розміщення операторів досліджень. Дана споруда застосовується для можливості запалення початкового осередку пожежі та механічного впливу на її конструкцію під час імітації її падіння.

Гондола вітрової установки складається з електричного двигуна (електрогенератора) зі шківом та оливо наповненого полімерного корпусу трансмісійного блоку. В якості пожежного навантаження гондоли використовується синтетична трансмісійна олива об'ємом 18 л та бензин марки А-95 у кількості 2 л. Верхня частина гондоли також фіксується запірним пристроєм до фасаду допоміжної споруди. На верхній частині корпусу гондоли встановлюється макетне вогнище пожежі класу В, у яке заливають 200 грам бензину марки А-95 для імітації початкового осередку пожежі.

На рисунку 3.3 наведено описані елементи ВЕУ.



Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд основних елементів ВЕУ.

Руйнування опори та займання ВЕУ є імітаційним процесом, а тому зона його падіння та потенційна зона можливої пожежі є прогнозованими. Кількість пожежної навантаги в гондолі залежить від потужності вітрової електроустановки та її моделі. Для даної серії експериментальних досліджень використовувався макет вітрової електроустановки потужністю 2 кВт з об'ємом оливи в корпусі до 20 л.

Перелік засобів вимірювальної техніки (далі - ЗВТ), які використовуються під час експериментальних вогневих досліджень, а також їх метрологічні характеристики наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Перелік засобів вимірювальної техніки

№ п/п	Найменування обладнання для досліджень	Характеристика	Значення характеристики	Одиниці вимірювання	Похибка
1.	Рулетка	відстань	1-3000	мм	1 клас точності (1метр - 0.2 мм)
2.	Секундомір	тривалість часу	1-3600	с	3 клас точності, $\pm 1,6$ с на 30 хв
3.	Психрометр аспіраційний МВ-4М	температура; вологість	$-10 \div 50$ $6 \div 100$	$^{\circ}\text{C}$, %	$\pm 0,2$ % ± 4 %
4.	Барометр-анероїд М67	тиск	$600 \div 800$	мм.рт.ст.	± 1 мм.рт.ст.
5.	Мірна ємність	літри	$0 \div 10$	л	0,05 л
6.	Анемометр крильчастий АСО-3	швидкість	$0,3 \div 5$	м/с	± 1 ($0,1 + 0,05 V_{\text{вим}}$) м/с
7.	Фото-відеокамера	розширення	48	Мпкселі	-
8.	Тепловізор	розширення	8,0	Мпкселі	-

Підготовка для проведення експериментальних досліджень передбачає наступні заходи. На першому етапі на поверхні вогневого майданчику еластичним маркером наносять розмітку з розміром чарунки 0,5 м для забезпечення візуального контролю майбутньої зони горіння. Переводять вежу макету вітрової електроустановки у вертикальне положення та закріплюють за допомогою пристрою з штопорним гвинтом до допоміжної споруди. На верхню частину вежі макету вітрової електроустановки монтується гондола з лопатями, при цьому перевіряється цілісність, надійність кріплень та герметичність корпусу

випробуваного макету вітрової електроустановки. На генератор (двигун) закріплюється деко макетного вогнища пожежі класу В діаметром 20 см та об'ємом 1л.

Наступний етап передбачає підготовку вимірювального обладнання та обладнання для проведення фото- та відео зйомок. Тепловізор влаштовується на штатив на верхівці допоміжної споруди таким чином, щоб уникнути можливості його падіння. Для більш якісного зняття значень температур з поверхні досліджуваного зразка виставляється коефіцієнт випромінювання згідно з рекомендаціями по використанню приладу. Учасники досліджень, що проводять фото-відео зйомку знаходяться за межами вогневого майданчику на відстані не менше 20 м в захисному одязі, який стійкий до потрапляння нафтових продуктів. Готуються первинні засоби пожежогасіння та перевіряється цілісність захисного одягу осіб, які проводять вогневі етапи роботи безпосередньо на допоміжній споруді.

Перед початком вогневих досліджень проводиться вимірювання і реєстрація параметрів зовнішнього середовища, а саме: температура повітря, швидкість вітру (повинна бути не більше 5 м/с), відносна вологість повітря, значення атмосферного тиску.

Заключний етап підготовки досліджень передбачає наповнення корпусу вітрової електроустановки оливою та бензином у пропорціях 1:10 (на 10 літрів оливи додають 1 л бензину). Для даного типу вітрової електроустановки використовувалося 18 літрів оливи та 2 літри бензину. В деко макетного вогнища пожежі, яке використовується як первинне джерело пожежі, яке влаштовується ззовні на корпусі вітрової електроустановки, заповнюється 200 грамами бензину.

Безпосередньо перед початком вогневих досліджень, розпочинається відео зйомка та вмикається тепловізор оператором досліджень. За командою керівника проведення досліджень, паливо в деці (бензин) підпалюють факелом, розштопорюють страхувальне кріплення вежі макету вітрової електроустановки до допоміжної споруди, а оператор вогневих робіт надає початковий імпульс конструкції в бік розміченої площадки вогневого майданчику. Оператор дослідження, що контролює тривалість горіння одночасно вмикає секундомір.

На рисунках 3.4-3.7 наведено фото фрагменту натурних вогневих досліджень.



Рисунок 3.4 – Початковий етап досліджень. Оператор підпалює паливо в деці.



Рисунок 3.5 – Другий етап натурних досліджень. Оператор здійснює імітаційне падіння ВЕУ.



Рисунок 3.6 – Третій етап натурних досліджень. Відбувається перша фаза горіння на максимальній площі.



Рисунок 3.7 – Четвертий етап натурних досліджень. Відбувається друга фаза горіння та формування стабільного осередку пожежі.

Під час всієї тривалості проведення вогневих досліджень фіксується площа горіння пожежі. Тривалість кожного дослідження складає 20 хвилин, що обґрунтовано максимальним нормативним часом прибуття пожежно-рятувальних підрозділів згідно з [95]. За допомогою нанесеної розмітки фіксуються точки по периметру зони горіння, де спостерігається горіння довше 2 хв. В якості критерію границі температурної зони визначається значення температури в 225 °С, що відповідає температурі займання трав'яної підстилки в екосистемах згідно довідкових даних [96]. На рисунку 3.6-3.7 наведено приклад фото із фіксацією зони горіння в результаті падіння дослідного макету вітрової електроустановки.

У процесі проведення натурних вогневих досліджень слід розуміти, що отримані результати мають експериментальний характер і, відповідно, підлягають впливу багатьох випадкових чинників, пов'язаних як із неоднорідністю матеріалів та конструкцій, так і з варіаціями зовнішніх умов (температура, вологість, напрямок повітряних потоків, точність вимірювального обладнання тощо). Тому для забезпечення достовірності, відтворюваності та статистичної надійності результатів необхідно проводити серію не менше ніж трьох дослідів. Проведення щонайменше трьох випробувань дозволяє розрахувати середнє значення основних показників (температури, часу займання та тривалості горіння, швидкості поширення полум'я тощо) та визначити їхню дисперсію. Це дає змогу оцінити похибку вимірювань і забезпечити прийнятну статистичну надійність результатів згідно з вимогами експериментальної методики. Одноразовий експеримент може бути випадковим і не відображати реальну поведінку об'єкта, тому повторення дослідів щонайменше тричі дозволяє виявити стабільні закономірності й виключити вплив аномальних або випадкових відхилень [85].

Також під час проведення повторних вогневих досліджень можна уточнити методику вимірювань, перевірити точність роботи ЗВТ, а також скоригувати умови проведення випробувань для підвищення точності та отримання репрезентативних результатів.

3.2 Проведення натурних вогневих досліджень розвитку пожежі за сценарієм «руйнування-пожеж» вітрової електроустановки

Існуючі методи визначення протипожежних відстаней між об'єктами не враховують сценарій аварійного розливу горючих рідин внаслідок руйнування корпусу одного із об'єктів. Таким чином, дослідження та аналіз найбільш небезпечних сценаріїв розвитку пожежі є передумовою удосконалення розрахункового методу визначення безпечних протипожежних відстаней та зниження потенційного пожежного ризику.

Визначені методологічні підходи організації експерименту та обґрунтовані показники, які характеризують небезпеку поширення пожежі в наслідок падіння ВЕУ, що супроводжується аварійним виливом оливи та утворенням низової пожежі є важливою складовою натурних вогневих досліджень. Разом з тим, для дослідження представленої гіпотези щодо потенційного впливу висоти опорної вежі ВЕУ та кількості палива в середині гондоли на значення протипожежних відстаней, слід провести серію натурних вогневих досліджень та систематизувати отримані дані, які характеризують потенційну пожежну небезпеку під час аварійного падіння вітрової електроустановки, що дозволить обґрунтувати відповідні протипожежні заходи.

Вплив фаз горіння на процеси оцінювання протипожежних відстаней є визначальним, оскільки саме розвинена фаза формує максимальні теплові навантаження. Правильне визначення протипожежних відстаней повинно враховувати інтенсивність вигорання матеріалів, геометрію зони полум'я, напрямок та швидкість вітру та тривалість стаціонарної фази пожежі [98,99].

Не врахування фазової структури розвитку пожежі призводить до недооцінки теплового впливу і, як наслідок, до небезпечного зменшення розрахункових відстаней між об'єктами.

У структурі формування пожежі традиційно виокремлюють три основні фази [100]:

- початкову (фаза розвитку);
- розвинену (стаціонарну);

- кінцеву (згасання).

Кожна з них характеризується особливим тепловим режимом, динамікою вигорання матеріалів та геометрією полум'я, що зумовлює різну небезпеку для суміжно розташованих об'єктів. Таким чином, ідентифікація фаз формування та протікання пожежі для аварійного сценарію ВЕУ «руйнування-пожежа» є важливим фактором, що дозволить оцінити характер потенційної небезпеки та ризики, які супроводжують даний процес.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- відтворити послідовність вогневих досліджень, згідно з розробленою методологією проведення натурних експериментальних вогневих досліджень поширення пожежі від вітрової електроустановки до суміжних об'єктів;

- систематизувати дані щодо зафіксованих граничних точок периметру зони пожежі, де спостерігалася стаціонарна фаза горіння довше 2 хв, що потенційно становить небезпеку для суміжно розташованих об'єктів;

- визначити максимальну тривалість горіння в зоні аварійного розливу оливи, що утворилася в результаті розгерметизації оливо наповнених частин вітрової електроустановки в наслідок горіння;

- визначити відстань до найвіддаленішої зони горіння в результаті падіння макету ВЕУ від початкової точки розміщення її опори;

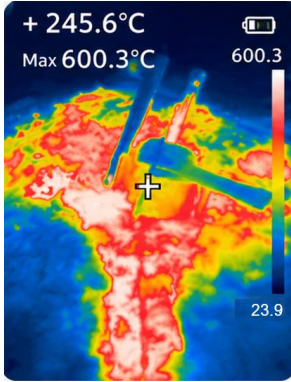
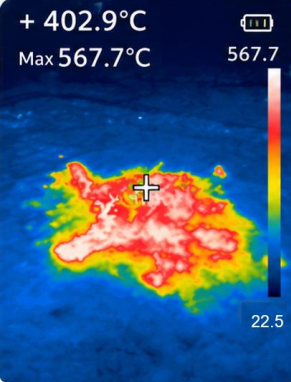
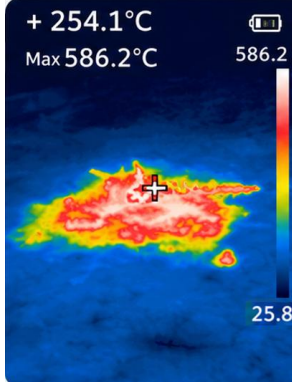
- сформулювати висновки щодо виявлених залежностей розвитку пожежі під час аварійного падіння вітрової електроустановки.

Перелік об'єктів, що входять до переліку програми-методики проведення натурних вогневих досліджень включають макет вітрової електроустановки висотою 10 м з оливо наповненим корпусом, тепловізійну камеру для контролю температурного режиму на поверхні вогневого майданчику, мірні ємності для забезпечення необхідною кількістю пожежної навантаги в середині корпусу ВЕУ та обладнання для проведення фото та відео зйомок .

За результатом проведення серії натурних вогневих досліджень визначено площі утворюваних осередків горіння в результаті падіння і займання елементів ВЕУ, а також отримано візуалізацію термокарт відносно вогневого майданчику.

В таблицях 3.2-3.4 наведено візуалізацію отриманих температурних розподілів на поверхні вогневого майданчику для кожного етапу натурального експерименту.

Таблиця 3.2 – Візуалізація термокарт для трьох експериментів на 2-й хвилині розвитку пожежі та зафіксовані значення площі пожежі.

№ експерименту	1	2	3
Термокарта розливу оливи в результаті падіння ВЕУ			
Площа горіння, м ² (±0,1 м)	18,4	17,2	19,7

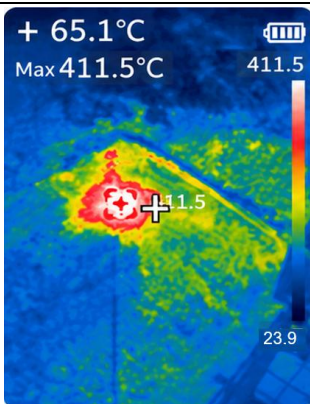
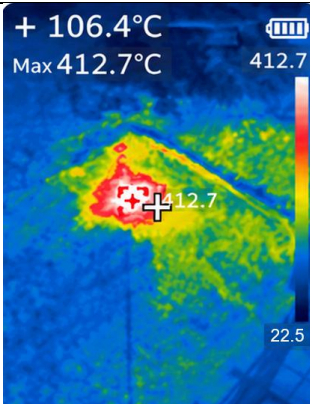
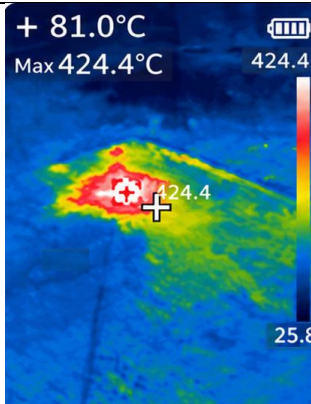
Отримані експериментальні дані свідчать, що при падінні вітрової електроустановки з кількістю палива в об'ємі корпусу 20 л початкова середня площа пожежі становить 18,4 м² при цьому, середнє значення температури на поверхні землі складало в межах 560-630 °С, що становить потенційну небезпеку для об'єктів будівництва, що можуть знаходитися в безпосередній зоні горіння. Також даний характер пожежі становить небезпеку додаткового виникнення низової пожежі в результаті займання сухої трави та чагарників.

Висока щільність ґрунту вогневого майданчику та його горизонтальна поверхня дозволяли дослідити «базові» умови процесів розвитку даного типу пожежі. Разом із тим слід розуміти, що у випадку іншого топографічного характеру розміщення вогневого майданчику в зоні падіння ВЕУ, характер поширення полум'я (та відповідно розлив палива), а також швидкість його вигорання будуть значно відрізнятися від даних умов [101].

Дана фаза розвитку пожежі характеризувалася інтенсивним вигоранням палива та великою швидкістю зменшення площі пожежі, що набуває сталої площі

в межах 10-11 хвилини за даних умов експерименту. В таблиці 3.3 наведено візуалізацію термокарт для трьох експериментів на 10-й хвилині розвитку пожежі та відповідні зафіксовані значення площі пожежі.

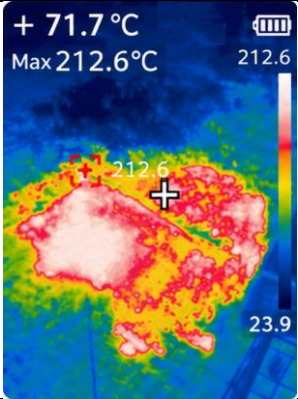
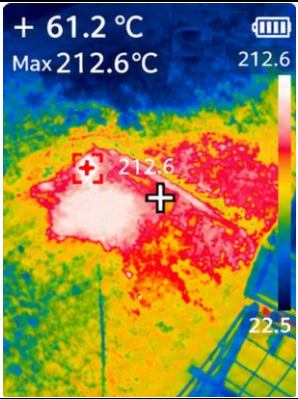
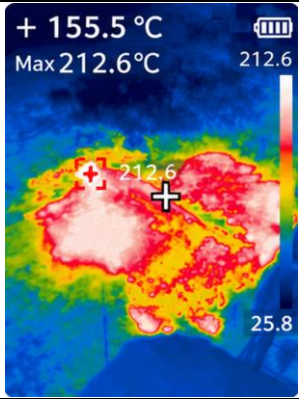
Таблиця 3.3 – Візуалізація термокарт для трьох експериментів на 10-й хвилині розвитку пожежі та зафіксовані значення площі пожежі.

№ експерименту	1	2	3
Термокарта зони горіння на 10 хвилині			
Площа горіння, м ² (±0,1 м)	6,7	7,1	7,4

Аналіз динаміки розвитку пожежі під час проведення серії експериментів демонструє, що під час процесу вільного горіння розлитого палива спостерігалось динамічне зменшення площі початкового осередку горіння. Площа горіння на 10 хвилині пожежі зменшувалася від початкового значення в середньому у 2,6 разів, що зумовлено незначним шаром палива на поверхні вогневого майданчику та швидкістю його вигорання в наслідок вільного доступу кисню. При цьому фіксувалися окремі осередки горіння, що обумовлено частковою нерівністю поверхні, які враховувалися під час визначення загальної площі пожежі, оскільки вони можуть впливати на утворення пожежі на суміжних об'єктах. За результатом аналізу отриманих експериментальних даних встановлено, що середнє значення площі пожежі на 10 хвилині її розвитку становило в межах 6,7-7,4 м² у порівнянні із початковою середньою площею в 18,4 м². На ступна фаза горіння характеризувалася кінцевою фазою горіння (процес згасання або самовигорання) та значним і швидким зменшенням площі пожежі.

В таблиці 3.4 наведено візуалізацію термокарт для трьох експериментів під час останньої хвилини горіння (загальна тривалість горіння) пожежної навантаги до моменту її само вигорання та відповідні зафіксовані значення площі.

Таблиця 3.4 – Параметри термокарт та площі розливу для трьох експериментів на час самовигорання та фактична тривалість горіння для кожного вогневого експерименту.

№ експерименту	1	2	3
Термокарта зони горіння після 10 хвилини			
Площа горіння, м ² (±0,1 м)	1,4	1,7	2,1
Загальна тривалість горіння розливу оливи, хв	18,0	18,5	19,2

Отримані дані свідчать, що загальна тривалість горіння утворених осередків пожежі до моменту їх само вигорання складає не більше 19,5 хвилин (середній час горіння складав 18,6 хвилин), при цьому середнє значення площі горіння для даного етапу експерименту складало 1,7 м². Таким чином, можливо зробити попередній висновок, що для даного типу вітрової електроустановки найбільш небезпечною фазою горіння є проміжок часу з 2-ої по 10-ту хвилину, при цьому ризик утворення низової пожежі (пожежі сухої трави, сільськогосподарських полів, торфу тощо) спостерігався у продовж всього етапу розвитку пожежі.

Під час проведення експериментальних досліджень, окрім фіксації даних щодо зменшення площі, температурних розподілів та тривалості вигорання палива, вищезазначені дані фіксувалися для проміжків часу у 2 хв, 5 хв, 10 хв, 15

хв та момент повного вигорання. Отримані дані дозволили проаналізувати динаміку розвитку та згасання пожежі, а також побудувати графік залежності для чинників, які характеризують небезпеку поширення вогню на потенційні суміжно розташовані об'єкти. На рисунку 3.8 наведено графіки динаміки розвитку пожежі під час проведення натурних вогневих досліджень розвитку пожежі за сценарієм «руйнування-пожеж» вітрової електроустановки.

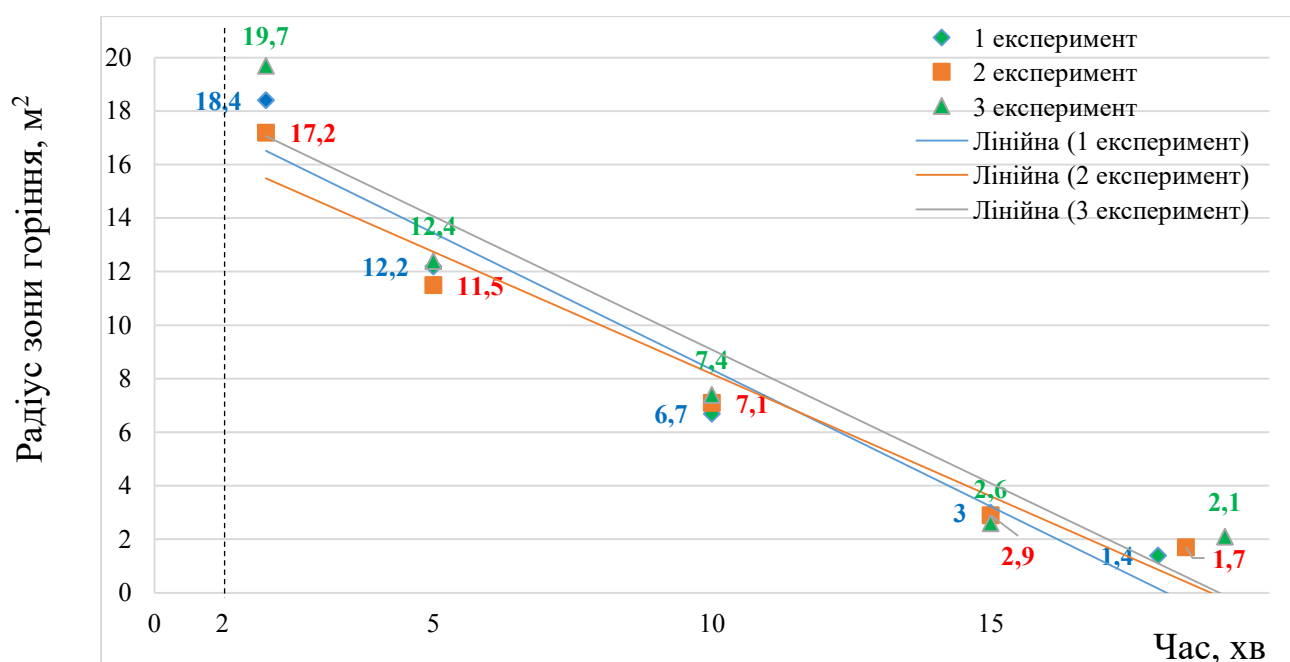


Рисунок 3.8 – Графіки динаміки розвитку пожежі під час проведення натурних вогневих досліджень за сценарієм «руйнування-пожеж» вітрової електроустановки.

Аналіз отриманих даних дозволив додатково визначити, що під час завершення фази само вигорання максимальна відстань від місця встановлення опори макету вітрової електроустановки, висота якої становила 10 м, до найвіддаленішої зони ураженої вогнем ділянки вогневого майданчику становила 15,6 м, що фактично на 56% перевищує фактичні геометричні розміри висоти вітрової електроустановки, без врахування геометричних параметрів конструкції лопатей.

Отримані експериментальні дані дозволять сформувавши попередні висновки, щодо удосконалення розрахункового методу визначення протипожежних відстаней для ВЕУ. Виявлені дані дозволять враховувати не тільки висоту ВЕУ та фактичну відстань від зони встановлення основи ВЕС, але і супутні чинники, що впливають на зменшення протипожежної відстані та є загрозою неконтрольованого поширення полум'я на суміжно розташовані об'єкти.

Проведені натурні вогневі дослідження розвитку пожежі під час аварійного падіння ВЕУ дозволили встановити залежності, які характеризують небезпеку поширення пожежі на суміжні об'єкти з врахуванням найбільш несприятливого сценарію розвитку пожежонебезпечної ситуації. Визначено, що для вітрової електроустановки потужністю до 2 кВт та кількістю оливи в корпусі ротора до 20 л площа пожежі, яка характеризується сталим температурним режимом в межах 500-600 °С становить від 12 м² до 7 м² тривалістю горіння до 11 хвилин. При чому, фактична відстань утворення такої зони пожежі, а також максимальне значення відстані від місця встановлення опори до краю осередку пожежі прямо пропорційно не залежить від висоти опори та може збільшуватися від значення її геометричної висоти до 56% за даних умов досліджень та конструктивних параметрів імітаційної установки.

Таким чином, проведені натурні вогневі дослідження розвитку пожежі під час аварійного падіння ВЕУ дозволять створити підґрунтя для удосконалення розрахункового методу оцінювання протипожежних відстаней із використанням рівняння променистого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності. Серед подальших завдань, постає питання дослідження більш широкого спектру вітрових електроустановок з врахуванням їх конструктивних параметрів, що впливають на зменшення протипожежних відстаней в разі їх падіння. Зазначене можливо досягти, в тому числі із використанням програмних комплексів, які дозволяють моделювати пожежонебезпечні сценарії виникнення та розвитку пожеж.

Висновки до розділу III

1. Розроблено програму-методику досліджень процесів поширення пожежі від об'єкта в умовах моделювання аварійної ситуації типу «руйнування–пожежа». Методика передбачає послідовне відтворення критичного сценарію аварії з урахуванням конструктивних особливостей об'єкта, характеристик матеріалів, умов навколишнього середовища та потенційних джерел займання. Такий підхід дозволяє визначити основні механізми розвитку пожежі, зони небезпечного впливу та ефективність заходів протипожежного захисту, що забезпечує науково обґрунтовану основу для підвищення рівня безпеки вітрових електроустановок.

2. Обґрунтовано місця влаштування засобів вимірювальної техніки, значення пожежної навантаги та критерії проведення досліджень. Забезпечено відтворюваність результатів натурних експериментальних досліджень та підтверджено загальну збіжність кожного окремого експерименту, при яких абсолютні відхилення між усередненими результатами експериментальних досліджень та кожною із серій експериментальних досліджень не перевищують 12 %.

3. Визначено, що для даних умов досліджень та конструктивних параметрів імітаційної установки потужністю до 2 кВт та кількістю оливи в корпусі ротора до 20 л, площа пожежі, яка характеризується сталим температурним режимом в межах 500-600 °С становила від 12 м² до 7 м² з тривалістю горіння до 11 хвилин. При цьому, фактична відстань утворення зони пожежі та максимальна відстань від місця встановлення опори ВЕУ до краю цієї зони не залежать прямо пропорційно від висоти її опори. Виявлено, що ці відстані можуть перевищувати геометричну висоту опори ВЕУ до 56% за даних умов проведених досліджень та з урахуванням конструктивних параметрів ВЕУ, що підкреслює важливість врахування реальних параметрів пожежі при розрахунку безпечних протипожежних відстаней.

4. Для забезпечення оптимізації дослідження процесів поширення пожежі в результаті падіння ВЕУ та вивчення більш широкого діапазону закономірностей для інших типів ВЕУ постає необхідність розробки комп'ютерної газо-гідродинамічної моделі, що відтворює умови натурних досліджень з врахуванням визначених критеріїв оцінювання.

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ВІД ВІТРОВОЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВКИ ЗА ДОПОМОГОЮ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ГАЗО-ГІДРОДИНАМІКИ

4.1 Формування програми досліджень поширення пожежі від вітрових електроустановок визначених типів

Для дослідження та проведення оцінювання сценаріїв розвитку пожежі та розповсюдження її небезпечних чинників відносно суміжних об'єктів ефективним інструментом є газо-гідродинамічне (CFD) моделювання, що проводилося на основі методів та підходів, визначених у [102]. Розробка та застосування CFD-моделей дозволяє дослідити потенційну динаміку поширення вогню від ВЕУ, визначити зони потенційної пожежної небезпеки та теплового впливу на суміжно розташовані об'єкти інфраструктури різного функціонального призначення.

Більшість газо-гідродинамічних моделей ґрунтуються на рівняннях Нав'є—Стокса для стисливого середовища [103] з урахуванням:

- поля швидкостей повітря;
- температурного поля навколишнього середовища;
- концентрації продуктів згоряння та динаміку концентрацій токсичних продуктів згоряння;
- процеси турбулентності висхідного потоку, в тому числі вплив сили вітру на вертикальне і горизонтальне поширення вогню.

Результати численних верифікацій показують, що моделі горіння, побудовані на основі газо-гідродинамічних підходів, забезпечують високу точність і збіжність розрахунків [104, 105]. Серед недоліків CFD-моделювання, зокрема у програмному середовищі PyroSim, слід відмітити те, що даний математичний комплекс самостійно не враховує деформацію ґрунту, але в рамках комбінованого підходу CFD–FEM–DEM може адекватно описати процеси руйнування вітрових електроустановок разом із поведінкою ґрунтової основи.

В основі програми досліджень поширення пожежі в результаті реалізації аварійного сценарію «руйнування-пожежа» та дослідження умов її поширення

зкладається принцип відтворення сценарію, коли опора гондоли вітрової електроустановки в результаті технологічної несправності втрачає несучу здатність та руйнується чим зменшує відстань між об'єктами [91]. Корпус гондоли під час падіння руйнується і весь об'єм оливи рівномірно розтікається на всю площу досліджуваного фрагменту майданчику. Під час створення моделі вітрової електростанції за основу технологічних вітрових електроустановок, геометричних параметрів, конструктивного виконання було взято відповідно їх моделі [106]: Vestas HVK V10 (30,00 кВт), Vestas V17 – 75 (75,00 кВт), Vestas V20 (100 кВт), Vestas V25 (200 кВт), Vestas V39 (500 кВт), Vestas V52 (NM) (900 кВт), Vestas V66-2.0 (2 МВт), Vestas V90-3.0 (3 МВт), Vestas V136-4.2 (4,20 МВт), Vestas V162-5.6 EnVentus (5,60 МВт), Vestas V172-7.2 EnVentus (7,2 МВт), Vestas V174-9.5 (9,5 МВт).

Під час створення розрахункового середовища імітаційної моделі питому теплоту згоряння пожежної навантаги приймали в межах 750 МДж/м^2 , як максимальне значення пожежної навантаги для оливовмісних технологічних установок. Кількість теплоти, що виділяється під час повного згоряння горючих матеріалів на одиницю площі поверхні вогневого майданчику прийнято, як для сухої трави або лугової рослинності 17 МДж/м^2 [107]. Лінійна швидкість поширення пожежі згідно з даними [108] прийнята 12 м/хв з врахуванням швидкості вітру 10 м/с .

Програма досліджень за допомогою комп'ютерного моделювання включає етап створення імітаційної моделі вітрової електроустановки з врахуванням її фактичної висоти, радіусу робочої зони лопатей та кількості оливи в середині ротору. Кратність обчислювальної області FDS для кожної розробленої моделі становить $0,25 \text{ м}$, що обумовлюється геометричними розмірами моделі ВЕУ та кратністю розмірів комірок розрахункової сітки щодо геометричних параметрів досліджуваного фрагменту вогневого майданчику. В моделі передбачено функцію візуалізації температурних розподілів на поверхні вогневого майданчику та простору по осі X в результаті дії змодельованої пожежі.

Згідно прийнятого сценарію основної фази розвитку пожежі вона утворилася та розвивається на поверхні ґрунту на площі, що розрахована згідно методики представленої в розділі 2, при цьому утворюваний тепловий потік вільно поширюється в усьому розрахунковому середовищі.

Комп'ютерна модель вітрових електроустановок визначених типів розроблена з урахуванням ключових факторів, що визначають динаміку поширення зовнішньої пожежі на поверхні ґрунту. Газо-гідродинамічна модель, створена на її основі, включає фізичні властивості матеріалів конструкцій, відтворених у моделі. Її зовнішній вигляд представлено на рисунку 4.1



Рисунок 4.1 – Візуалізація базової моделі основних досліджуваних типів вітрових електроустановок створених в середовищі PyroSim.

В основі основних матеріалів конструкцій моделей вітрових електроустановок використовувався метал, при цьому прийнято що густина сталі складала 7750 кг/м^3 , питома теплоємність $0,48 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ та теплопровідністю $15,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, коефіцієнт випромінення $0,85$. В основі основної несучої опори закладено бетон, густиною 1950 кг/м^3 , питома теплоємність $0,81 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ та теплопровідністю $0,64 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. В якості конструкції вітрових лопатей та окремих елементів корпусу гондולי використано полімерні матеріали густиною 890 кг/м^3 , питома теплоємність $0,69 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ та теплопровідністю $0,21 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ та ґрунт

густиною 5510 кг/м^3 , з питомою теплоємністю $0,87 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ та теплопровідністю $4,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. На рисунку 4.2 наведено основні компоненти моделі, параметри яких закладено в моделі вітрової електроустановки.

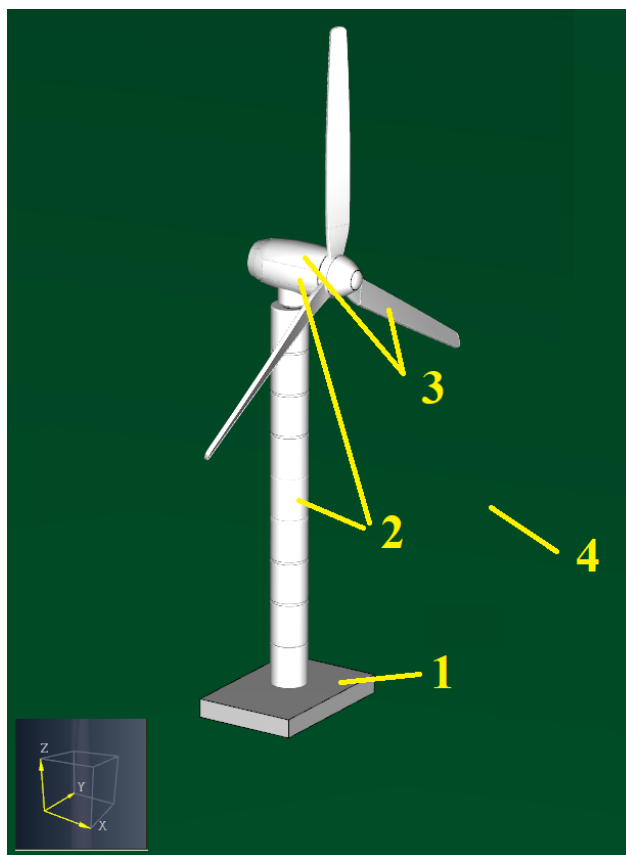


Рисунок 4.2 – Основні складові компоненти параметрів вітрової електроустановки, де: 1 – бетонна основа; 2 – вежа та гондола; 3 – лопаті; 4 – навколишній простір.

В якості критерію, який характеризує небезпеку поширення пожежі прийнято значення температури у $250 \text{ }^\circ\text{C}$, що відповідає температурі деформації основного матеріалу з найменшим температурним опором, а саме полімерних матеріалів згідно з [109]. Даний тип матеріалів широко застосовується в об'єктах будівництва різного функціонального призначення, технологічних установках та транспортній індустрії.

Під час відтворення моделі ВЕУ не відтворювалися компоненти її системи протипожежного захисту та зокрема системи автоматичного пожежогасіння для

імітації найгірших умов, які сприятимуть вільному розвитку та поширенню пожежі, в тому числі на досліджуваній ділянці вогневого майданчику.

Тривалість проведення моделювання для кожного досліджуваного типу вітрових електроустановок складала не менше 10 хвилин, що згідно попередніх натурних вогневих досліджень відповідає тривалості початкової фази пожежі з максимальною площею горіння та характеризується сталим прогнозованим режимом подальшого горіння. Окрім цього, дана тривалість досліджень також задовольняє критерій, що висувається до нормативного часу прибуття пожежно-рятувальних підрозділів для міста [95].

Для можливості додаткової візуалізації отриманих даних для зони досліджуваного фрагменту вогневого майданчику, використовується можливість візуалізації поверхні досліджуваних об'єктів із можливістю анімації динаміки утворення температурних полів у просторі. Окрім цього, під час проведення моделювання, враховувалася наявність бокового вітру із значенням 10 м/с в найбільш несприятливому напрямку, що згідно досліджень [110, 111] місцевості роботи типових ВЕУ.

В рамках реалізації методики передбачаються зовнішні умови при яких відсутні атмосферні опади та з наступними параметрами навколишнього середовища:

- температура повітря від 20 °С;
- атмосферний тиск від до 90 кПа;
- відносна вологість повітря 50%;
- швидкість вітру 10 м/с.

За результатом комп'ютерного моделювання процесів поширення пожежі від вітрових електроустановок визначених типів для кожного етапу моделювання отримані дані вносяться до зведеної таблиці, що дозволить сформулювати загальні висновки щодо виявлених закономірностей процесів поширення та впливу пожежі від ВЕУ.

4.2 Розробка обчислюваної газо-гідродинамічної моделі для моделювання процесів поширення пожежі за сценарієм «руйнування-пожежа»

За результатом аналізу пожежонебезпечних ситуацій, які виникали на ВЕУ визначено, що найбільш несприятливим сценарієм розвитку пожежі є сценарій «руйнування-пожежа». У конструкції гондоли та лопатей ВЕУ використовуються композитні матеріали на основі епоксидних смол, склопластику та карбону, які при руйнуванні утворюють велику кількість горючого пилу та підтримують інтенсивне горіння. У разі механічного руйнування ротора або лопатей ВЕУ відбувається раптове вивільнення кінетичної енергії, що може викликати іскроутворення, коротке замикання або механічне пошкодження електрообладнання, яке стає джерелом займання. При цьому слід розуміти, що у разі руйнування конструкції ВЕУ втрачається працездатність систем моніторингу і віддаленого відключення, що призводить до неконтрольованого розвитку пожежі. Таким чином, в основі створеної обчислюваної газо-гідродинамічної моделі для моделювання процесів поширення пожежі за сценарієм «руйнування-пожежа» початковим етапом розрахунку є утворення осередку пожежі в зоні падіння ротору. Параметри топографічної моделі вогневого майданчику передбачають наявність плоскої горизонтальної моделі ґрунту, при цьому коефіцієнт проникнення оливи під час її витікання з корпусу гондоли не враховується, з точки зору відтворення найгіршого варіанту сценарію утворення і розвитку пожежі.

На рисунку 4.3 наведено візуалізацію моделі досліджуваного майданчику та досліджуваних типів ВЕУ після їх падіння.

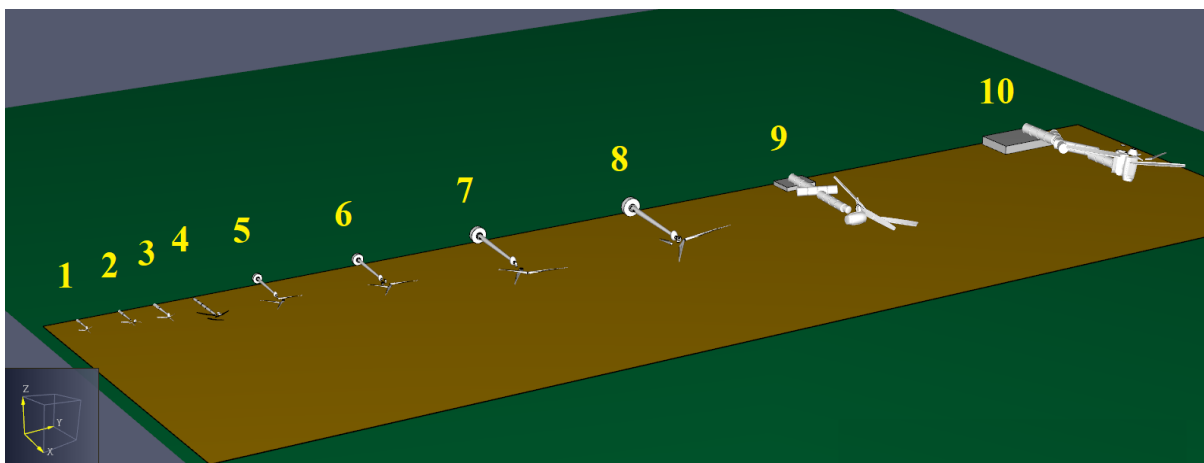


Рисунок 4.3 – Візуалізація початкового ситуаційного розміщення досліджуваних моделей за сценарієм «руйнування-пожежа».

Для оптимізації розрахункового процесу щодо дослідження процесів поширення пожежі для ВЕУ, базову модель, яка складається з 10 основних типів вітрових установок розділено на 4 підтипи за потужністю, а саме:

- від 0,03 МВт до 0,2 МВт;
- від 0,5 МВт до 2,0 МВт;
- від 3,0 МВт до 7,2 МВт.
- до 9,5 МВт.

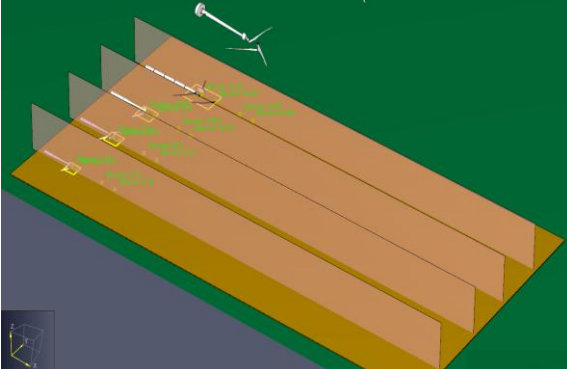
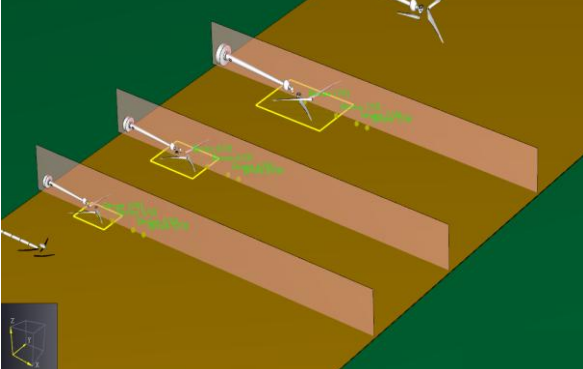
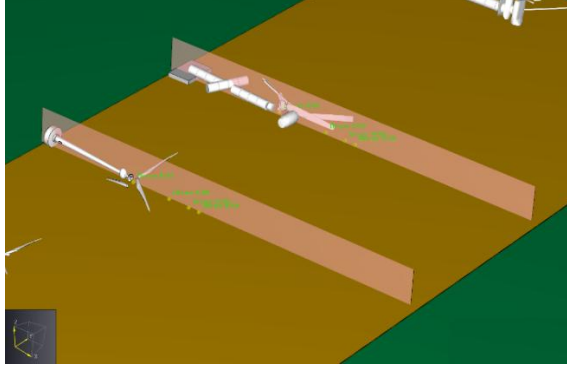
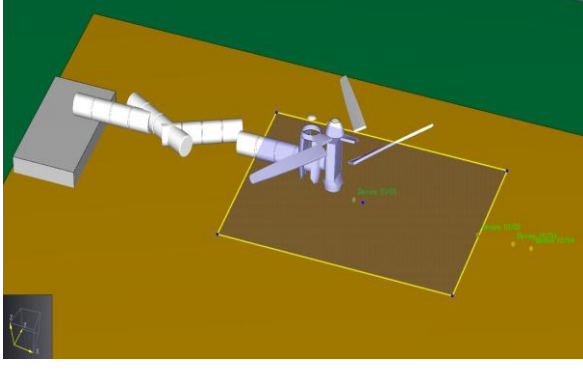
За результатом моделювання за кожним етапом досліджень фіксується та заноситься до таблиці найбільше значення площі критичного прогріву (більше значення 250 °С) та радіусу розливу R_2 від центру осередку пожежі до його краю, де фіксувалася температура в 250 °С, які були зафіксовані в зоні кожної досліджуваної ділянки вогневого майданчику. Також фіксується візуалізація термокарти критичних значень температури на поверхні вогневого майданчику. Для кожної групи ВЕУ встановлюються датчики контролю температури в просторі для дослідження значень протипожежних відстаней. Зазначені вимірювачі встановлювалися на висоті 1,0 м на відстані 5 м, 10 м, 15 м, а також в центрі та на границі розрахункового осередку пожежі.

Отримані результати моделювання дозволять зробити висновки щодо виявлених закономірностей поширення пожежі в залежності від типу ВЕУ,

зокрема їх висоти та кількості оливи в об'ємі механічної частини ротора. На основі отриманих даних планується побудувати графік відповідних залежностей.

В таблиці 4.1 наведено розбиті фрагменти моделі для чотирьох етапів моделювання для кожної визначеної групи ВЕУ.

Таблиця 4.1 – Візуалізація досліджуваних груп ВЕУ.

	
1 група ВЕУ від 0,03 МВт до 0,2 МВт	2 група ВЕУ від 0,5 МВт до 2 МВт
	
3 група ВЕУ від 3 МВт до 7,2 МВт	4 група ВЕУ до 9,5 МВт

Параметри вітрового навантаження, які закладаються в моделі передбачають окрім визначеної швидкості 10 м/с, відтворення кутового фронту за напрямом осі X в межах °270 та тиску 45 Па. Разом із цим, наявність даного вітрового навантаження не впливатиме на ситуаційне розміщення елементів корпусу зруйнованої ВЕУ.

Визначені вихідні дані та розрахунковий сценарій для визначених типів та груп ВЕУ є базовим сценарієм і дозволяє дослідити процеси впливу розрахункової пожежі на її поширення по фрагменту ґрунту вогневого майданчику. Слід розуміти, що представлений сценарій не враховує потенційний вплив на суміжно

розташовані об'єкти будівництва різного функціонального призначення. Таким чином, отримані температурні розподіли в просторі є орієнтовні, і під час проведення визначення реальних безпечних протипожежних відстаней між об'єктами, динаміка поширення небезпечних чинників пожежі повинна бути уточнена з врахуванням фактичних конструктивних параметрів ВЕУ та суміжних об'єктів, а також та умов навколишнього середовища.

4.3 Результати експериментальних досліджень щодо оцінювання впливу пожеж від визначених типів вітрових електроустановок та їх узагальнення

За результатом проведеного моделювання у продовж визначеного часу, а саме 600 секунд пожежа від зруйнованого корпусу ВЕУ вільно поширювалася на визначеній ділянці вогневого майданчику. За результатом проведених розрахункових дій визначено карту теплового впливу для кожного етапу моделювання. На рисунку 4.4-4.5 наведено візуалізацію пожежі та картограму температурних розподілів отриманих при моделюванні пожежі для першої групи ВЕУ від 0,03 МВт до 0,2 МВт.

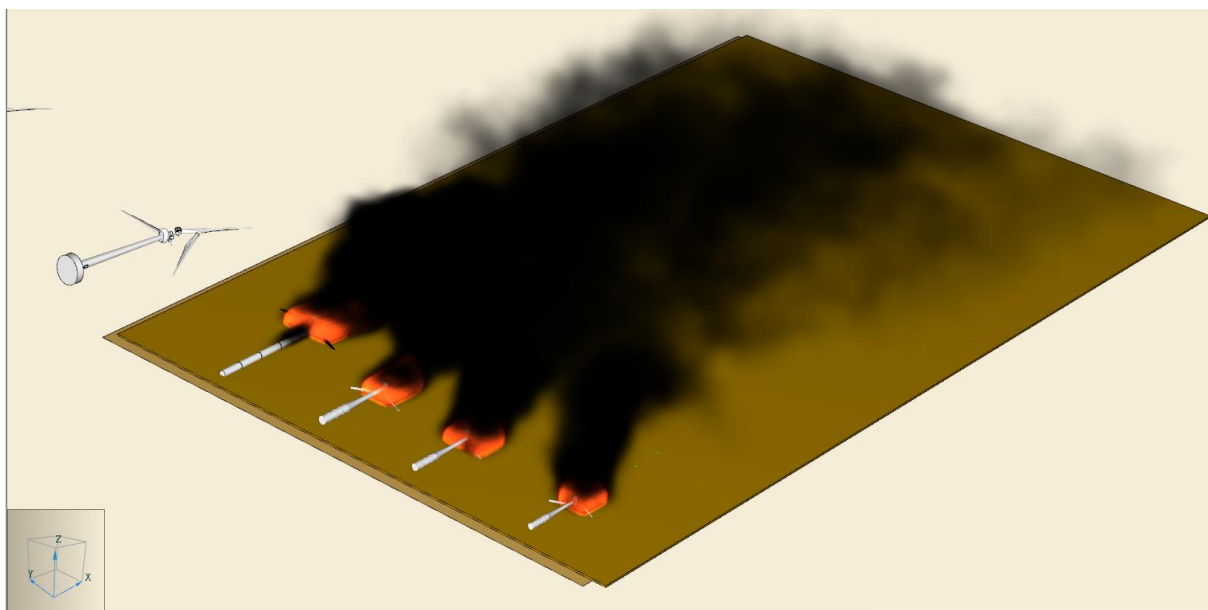


Рисунок 4.4 – Візуалізація процесу розвитку пожежі для першої групи ВЕУ.

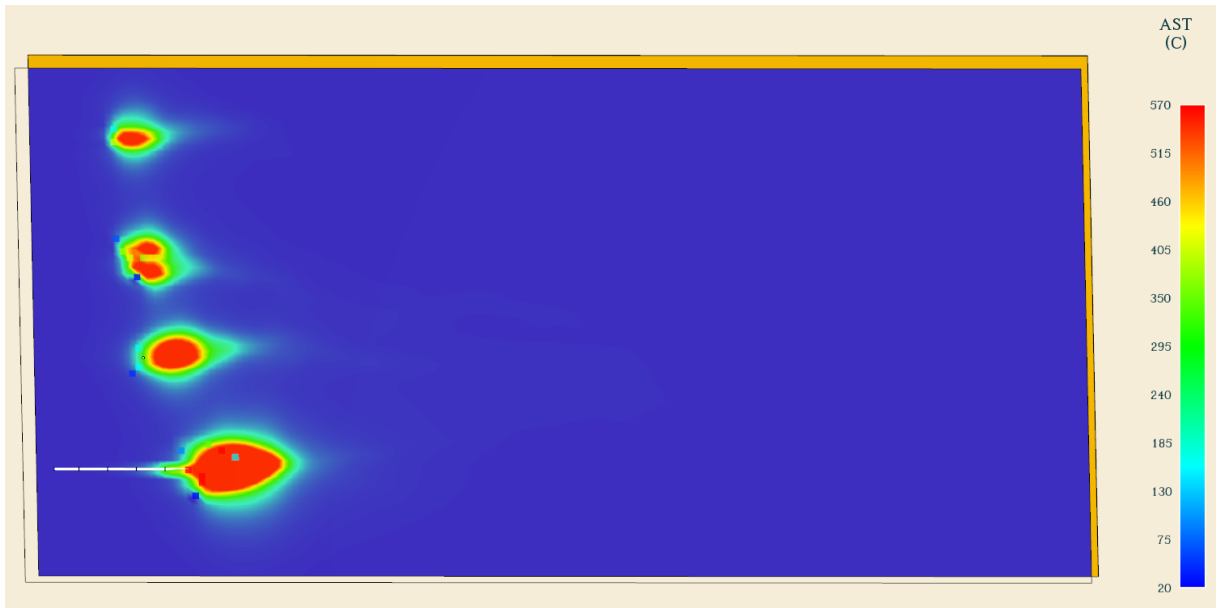


Рисунок 4.5 – Візуалізація температурних розподілів в результаті розвитку пожежі на поверхні ґрунту для першої групи ВЕУ.

Також за результатом першого етапу моделювання визначено температурні розподіли від змодельованих осередків пожежі в просторі, візуалізацію яких наведено на рисунку 4.6.

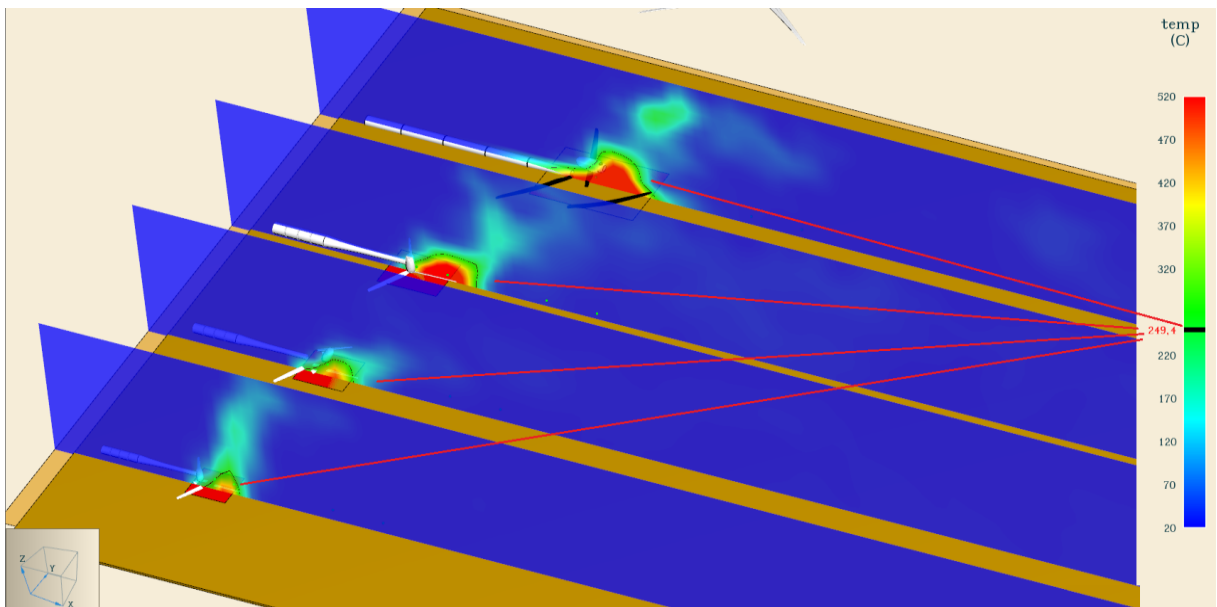


Рисунок 4.6 – Візуалізація динаміки поширення температурних розподілів у розрахунковому просторі та зона граничного значення у 250 °С.

За результатом аналізу даних, отриманих від вимірювачів в газовому середовищі, побудовано усереднений графік температурного режиму в зоні осередку горіння для першої групи ВЕУ.

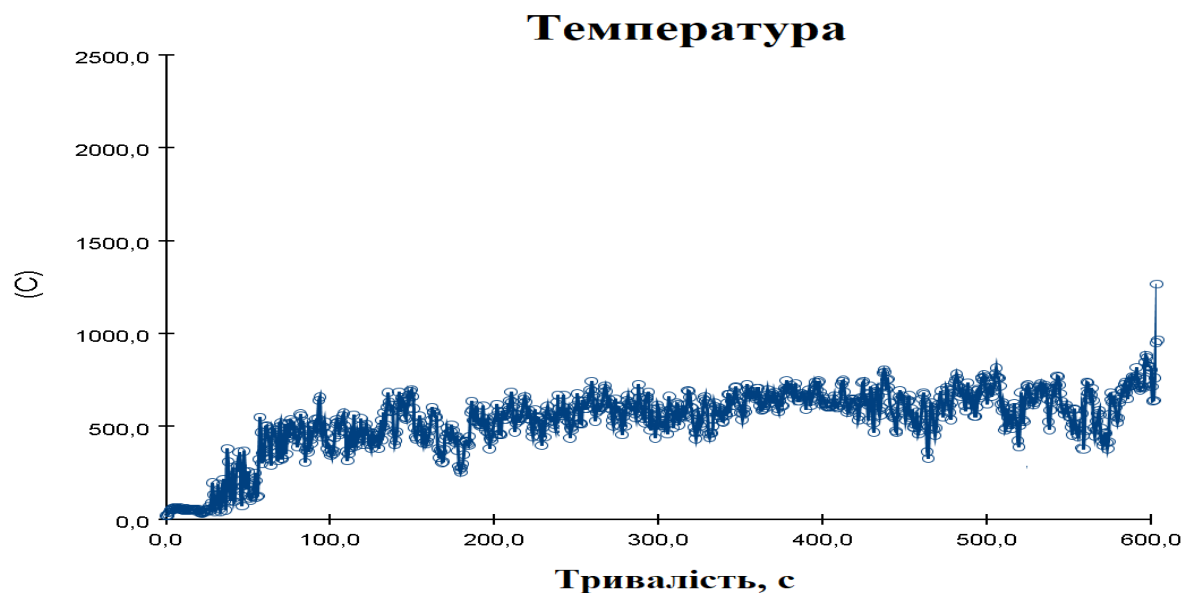


Рисунок 4.7 – Усереднений графік температурного режиму в зоні осередку горіння для першої групи ВЕУ.

Отримані дані свідчать, що для першої групи ВЕУ, з потужністю від 0,03 МВт до 0,2 МВт (висота опори 18-38 м) та кількістю оливи 12-80 л, середній температурний режим пожежі протікав у межах 580-650 °C та мав прогнозований характер її розвитку. Таким чином, збільшення часу моделювання є недоцільним.

За результатом моделювання розрахункового сценарію пожежі за другим етапом визначено температурні розподіли від змодельованих осередків пожежі в просторі, а також границі критичних значень температури згідно із визначеними критеріями. На рисунках 4.8-4.9 наведено візуалізацію пожежі та картограму температурних розподілів отриманих при моделюванні пожежі для другої групи ВЕУ від 0,5 МВт до 2 МВт.

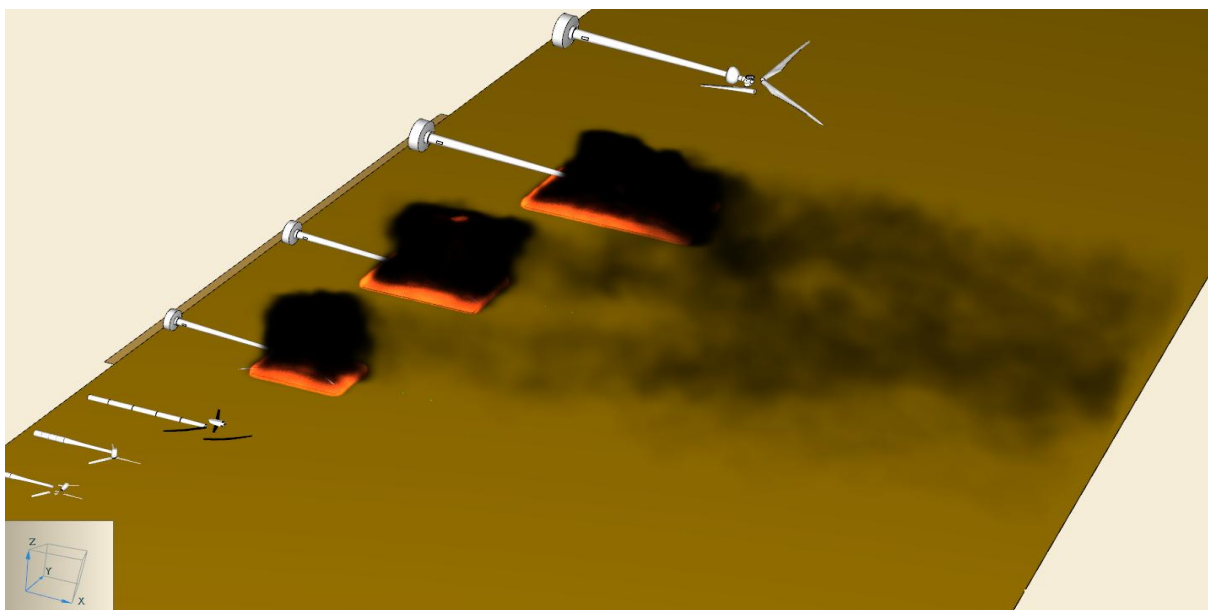


Рисунок 4.8 – Візуалізація процесу розвитку пожежі для другої групи ВЕУ.

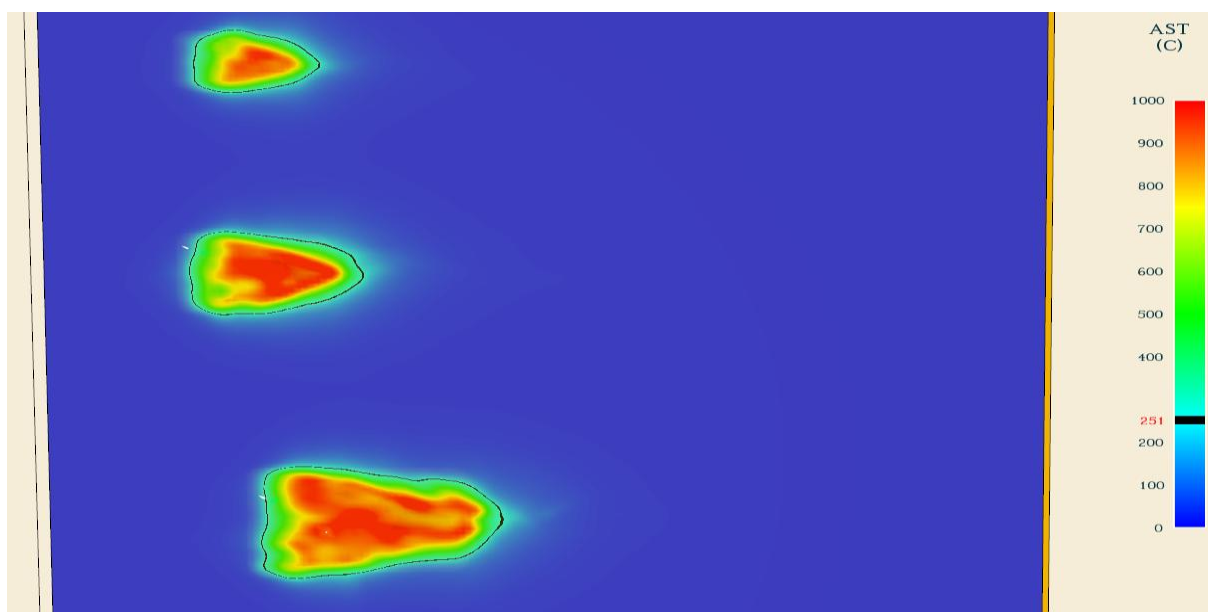


Рисунок 4.9 – Візуалізація температурних розподілів в результаті розвитку пожежі на поверхні ґрунту для другої групи ВЕУ.

За результатом проведеного другого етапу комп'ютерного моделювання розвитку пожежі визначено температурні розподіли від змодельованих осередків пожежі в просторі, візуалізацію яких наведено на рисунку 4.10.

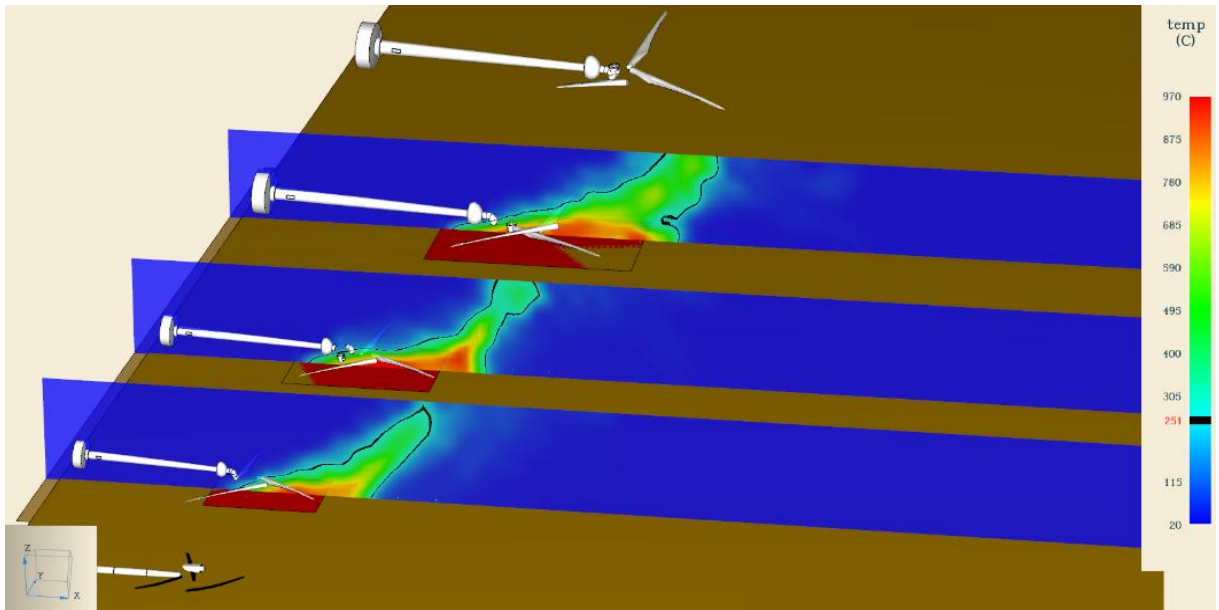


Рисунок 4.10 – Візуалізація динаміки поширення температурних розподілів у розрахунковому просторі та зона граничного значення температури у 250 °С.

За результатом аналізу даних, отриманих від вимірювачів в газовому середовищі, побудовано усереднений графік температурного режиму в зоні осередку горіння для другої групи ВЕУ.

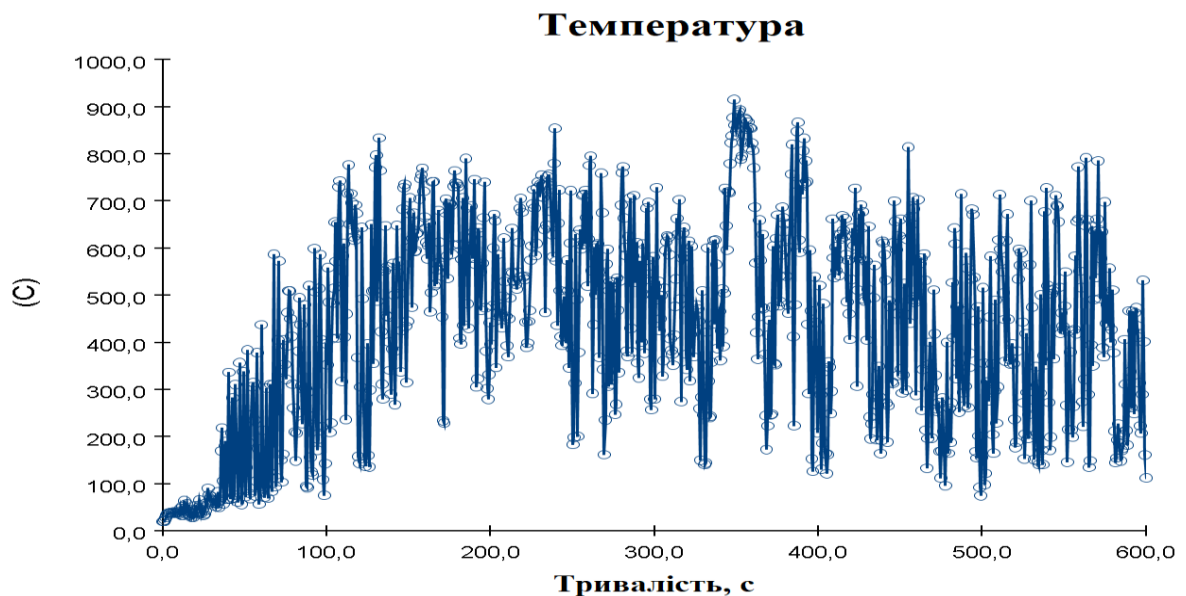


Рисунок 4.11 – Усереднений графік температурного режиму в зоні осередку горіння для другої групи ВЕУ.

Отримані дані свідчать, що для другої групи ВЕУ, з потужністю від 0,5 МВт до 2,0 МВт (висота опори 40-78 м) та кількістю оливи 200-720 л, середній температурний режим пожежі протікав у межах 620-690 °С та мав прогнозований характер її розвитку.

За результатом моделювання розрахункового сценарію пожежі за третім етапом визначено температурні розподіли від змодельованих осередків пожежі в просторі, а також границі критичних значень температури згідно із визначеними критеріями. На рисунках 4.12-4.13 наведено візуалізацію пожежі та картограму температурних розподілів отриманих при моделюванні пожежі для третьої групи ВЕУ від 3,0 МВт до 7,2 МВт.

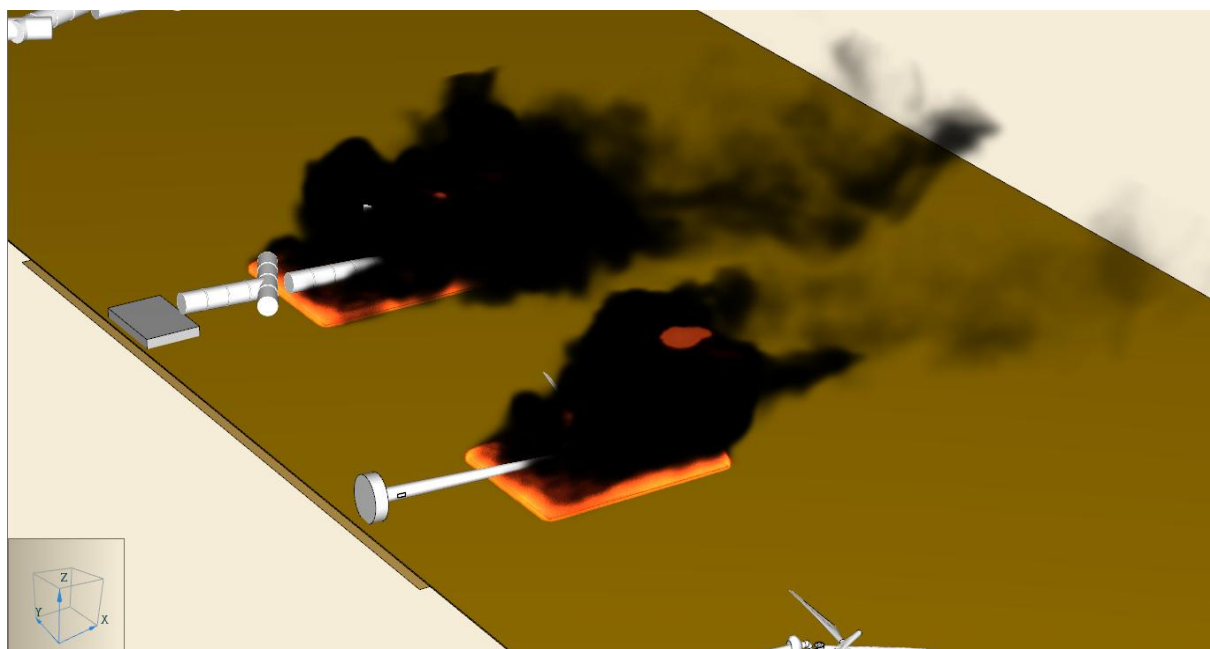


Рисунок 4.12 – Візуалізація процесу розвитку пожежі для третьої групи ВЕУ.

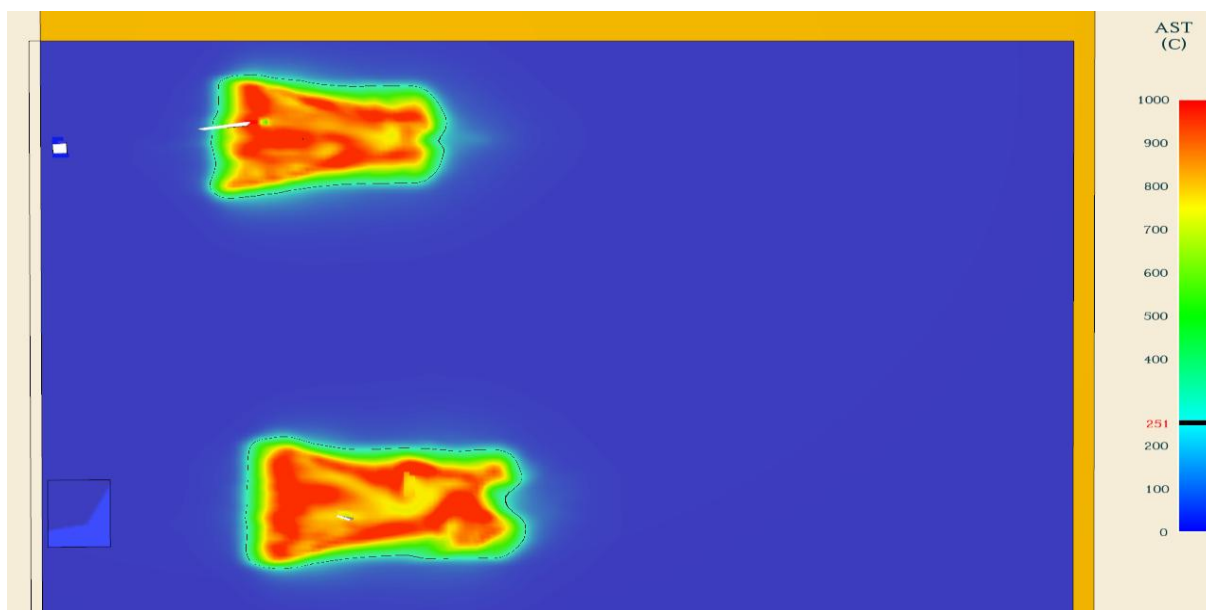


Рисунок 4.13 – Візуалізація температурних розподілів на поверхні ґрунту в результаті розвитку пожежі для третьої групи ВЕУ

За результатом третього етапу моделювання визначено температурні розподіли від змодельованих осередків пожежі в просторі, візуалізацію яких наведено на рисунку 4.14.

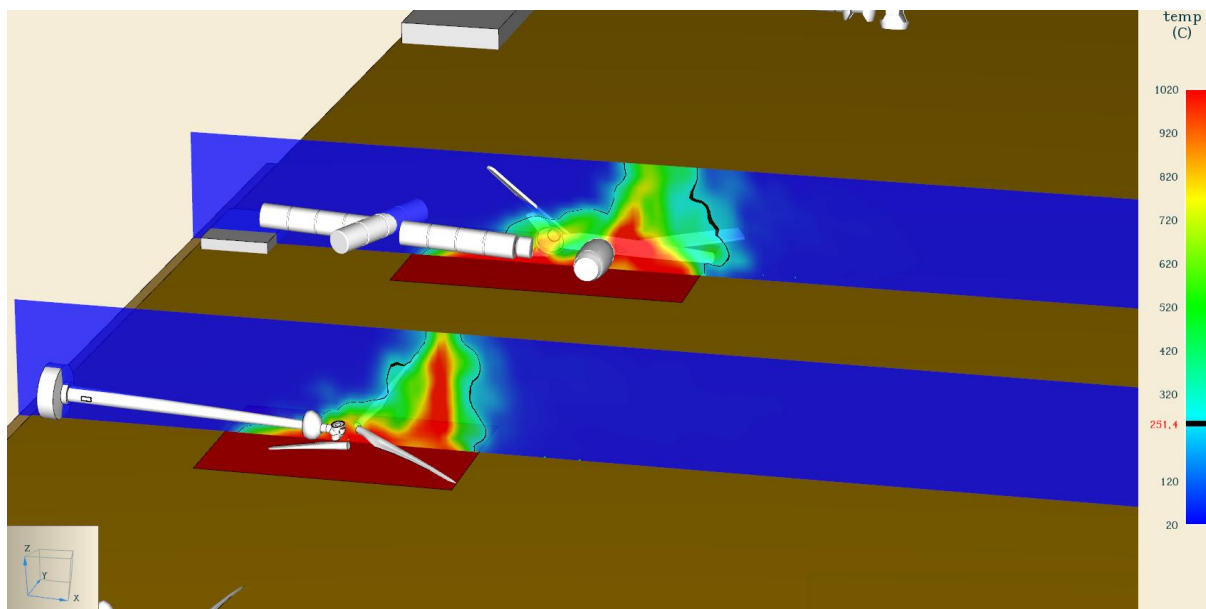


Рисунок 4.14 – Візуалізація динаміки поширення температурних розподілів у розрахунковому просторі та зона граничного значення температури у 250 °С.

За результатом аналізу даних, отриманих від вимірювачів в газовому середовищі, побудовано усереднений графік температурного режиму в зоні осередку горіння для третьої групи ВЕУ.

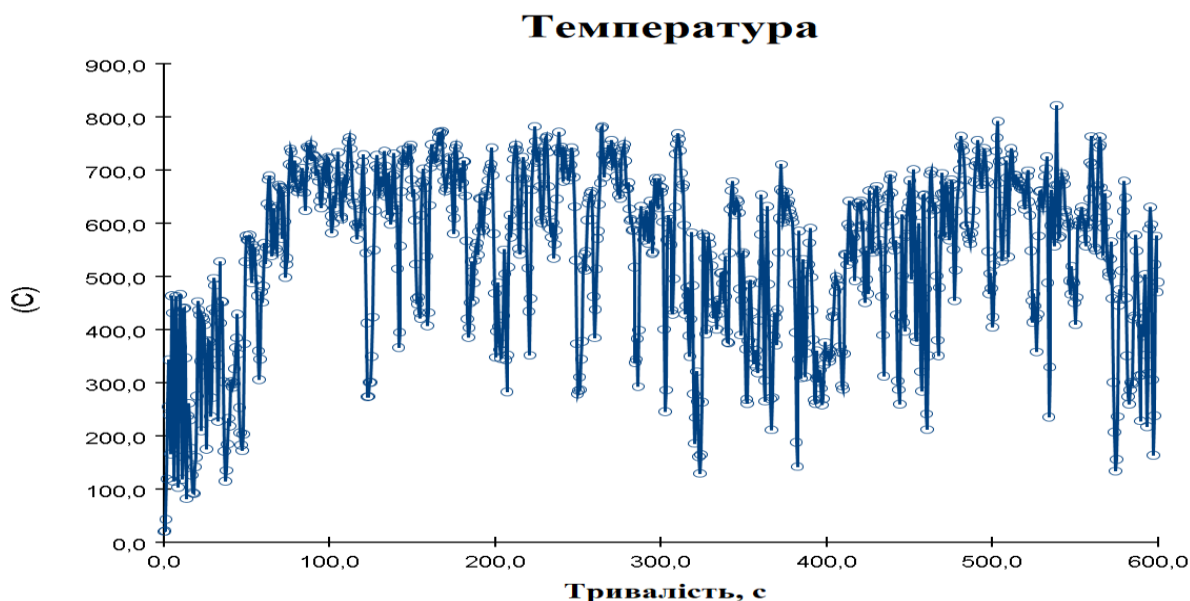


Рисунок 4.15 – Усереднений графік температурного режиму в зоні осередку горіння для третьої групи ВЕУ.

Отримані дані свідчать, що для третьої групи ВЕУ, з потужністю від 3,0 МВт до 5,6 МВт (висота опори 80-169 м) та кількістю оливи 1200-2720 л, середній температурний режим пожежі протікав у межах 680-740 °C та мав прогнозований характер її розвитку.

Останній, четвертий етап моделювання розрахункового сценарію пожежі для четвертого типу ВЕУ потужністю 9,5 кВт та кількістю оливи в об'ємі механічної частини ротора до 3800 л передбачав також визначити температурні розподіли від змодельованих осередків пожежі в просторі, а також границі критичних значень температури згідно із визначеними критеріями. Серед особливостей моделювання для даного типу ВЕУ передбачається моделювання руйнування несучої опори гондоли, що спостерігалось на ряді аварій для аналогічних типів ВЕУ. На рисунку 4.16-4.17 наведено візуалізацію пожежі та картограму температурних розподілів отриманих під моделювання пожежі для даної групи ВЕУ.

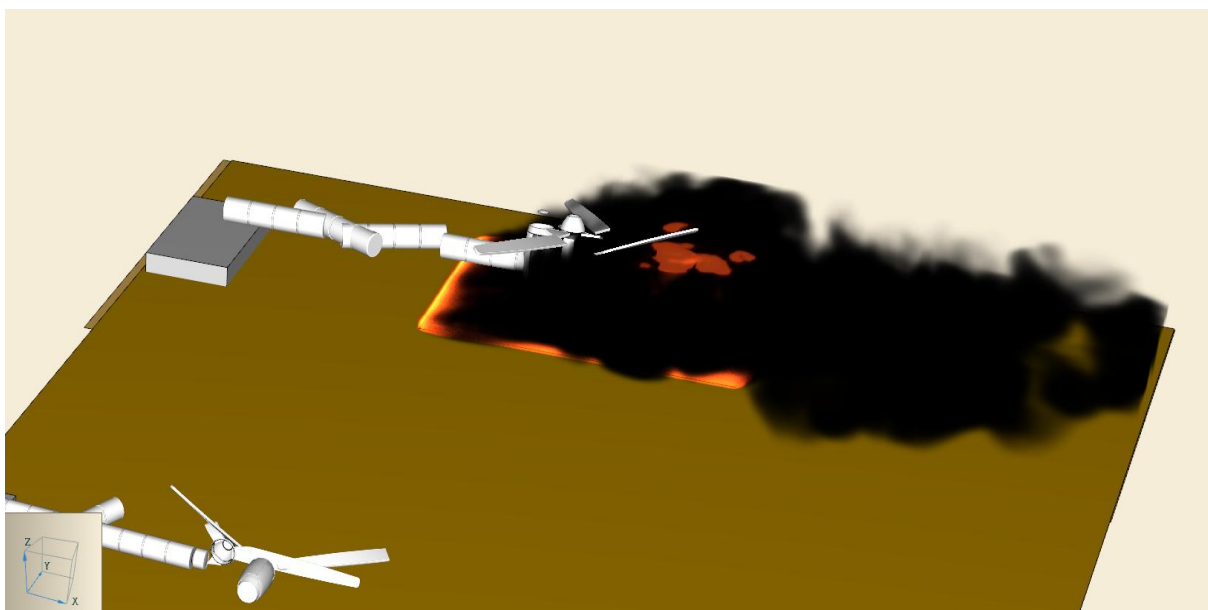


Рисунок 4.16 – Візуалізація процесу розвитку пожежі для четвертої групи БЕУ.

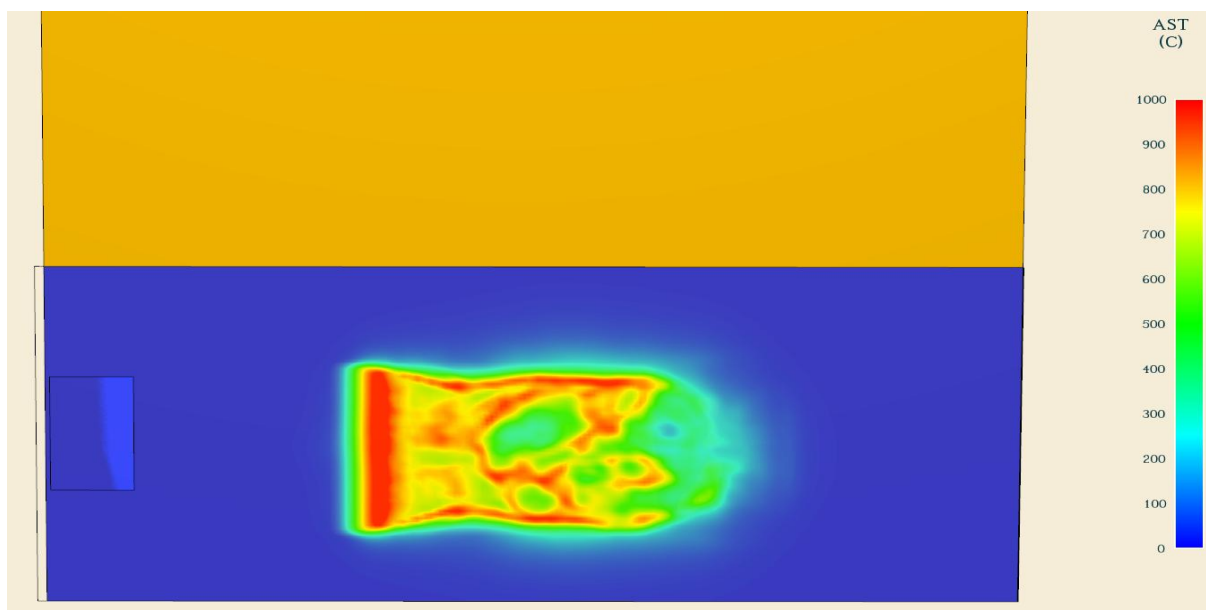


Рисунок 4.17 – Візуалізація температурних розподілів на поверхні ґрунту в результаті розвитку пожежі для четвертої групи БЕУ.

За результатом третього етапу моделювання визначено температурні розподіли від змодельованих осередків пожежі в просторі, візуалізацію яких наведено на рисунку 4.18.

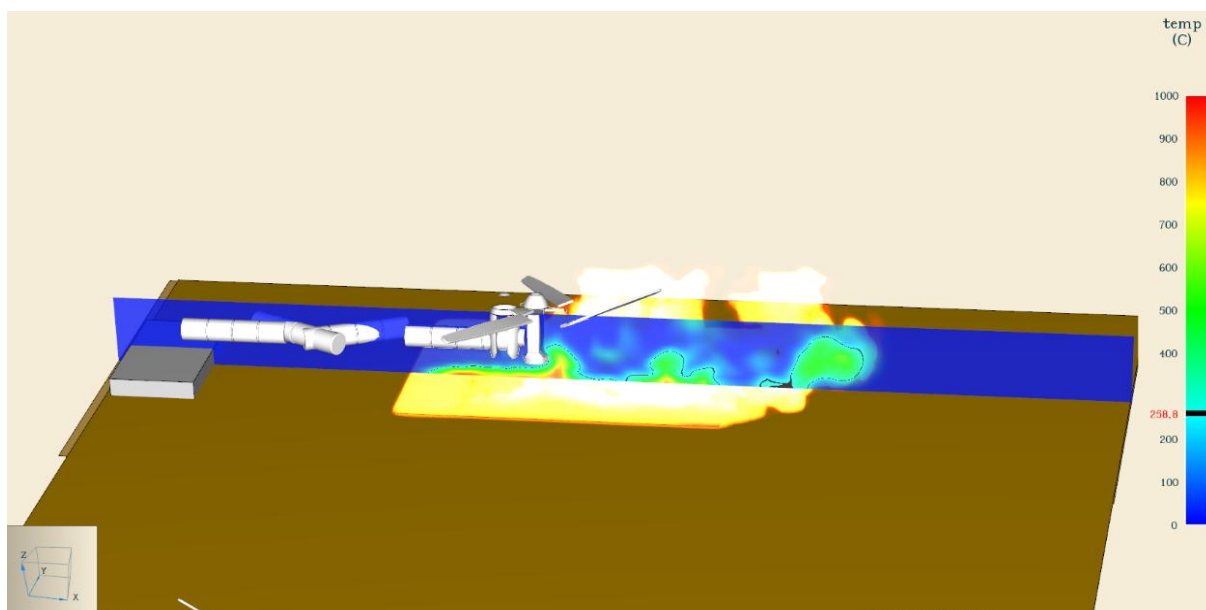


Рисунок 4.18 – Візуалізація динаміки поширення температурних розподілів у розрахунковому просторі та зона граничного значення температури у 250 °С.

За результатом аналізу даних, отриманих від вимірювачів в газовому середовищі, побудовано усереднений графік температурного режиму в зоні осередку горіння для четвертої групи ВЕУ.

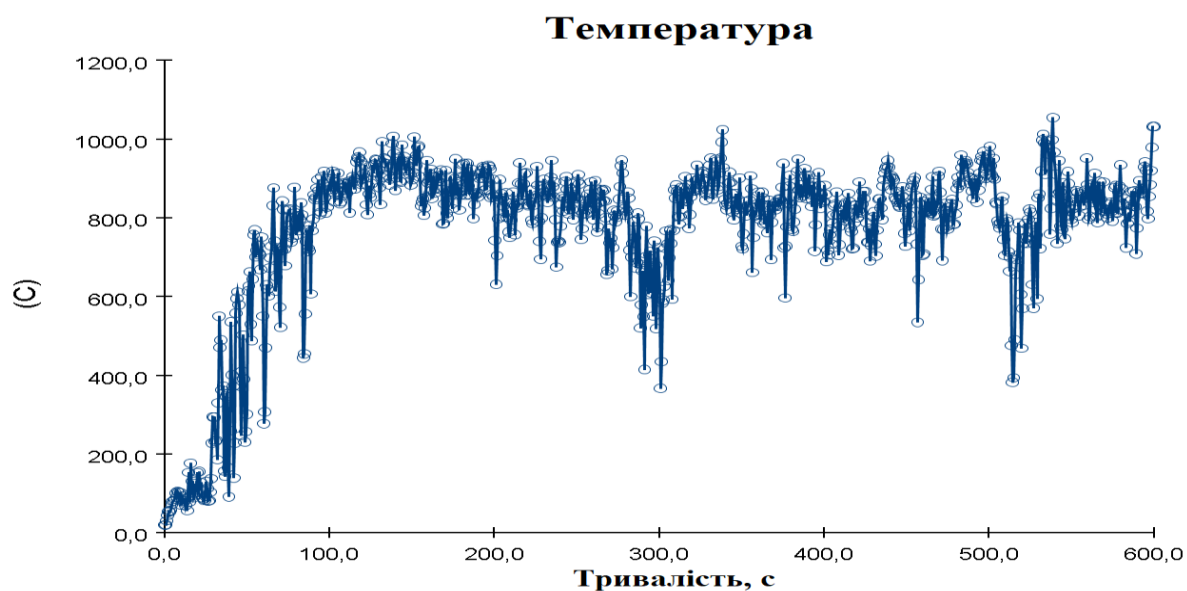


Рисунок 4.19 – Усереднений графік температурного режиму в зоні осередку горіння для четвертої групи ВЕУ.

За результатом проведених етапів моделювання за сценарієм «руйнування-пожежа», проведемо узагальнення отриманих даних, щодо потенційного небезпечного радіусу дії теплового впливу з врахуванням вітрового навантаження 10 м/с в сторону суміжно розташованого об'єкту для визначених типів ВЕУ, що приведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Зведені дані щодо розрахункового радіусу розливу та орієнтовних зон теплового впливу для визначених типів ВЕУ

Н/п	Потужність, кВт	Висота башти R1, м	Кількість оливи у об'ємі механічної частини ротора, л	Розрахунковий радіус розливу, R2, м ($\pm 0,3$ м)	Орієнтовний радіус теплового впливу вище 250 °С, м ($\pm 0,2$ м)
1	0,03	18	12 (± 2)	2,0	3,3
2.	0,075	22	30 (± 4)	3,1	5,7
3.	0,1	24	40 (± 5)	3,6	7,2
4.	0,2	30-38	80 (± 12)	5,1	10,5
5.	0,5	40-53	200 (± 25)	8,1	15,4
6.	0,9	61-73	360 (± 40)	11,0	18,7
7.	2,0	60-78	720 (± 60)	15,2	26,7
8.	3,0	80-105	1200 (± 90)	19,6	31,4
9.	4,2	104-112	1200 (± 90)	19,6	31,4
10.	5,6	119-166	1680 (± 100)	23,2	33,8
11.	7,2	112-199	2720 (± 170)	30,0	47,6
12.	9,5	індиві- дуально	3800 (± 200)	34,8	62,7

За результатом узагальнення отриманих даних побудуємо графік залежності утворення небезпечного радіусу температурного впливу пожежі від кількості оливи у об'ємі механічної частини ротора та порівняємо її з прогнозованою площею розливу оливи.

Залежність радіусів зон від кількості оливи

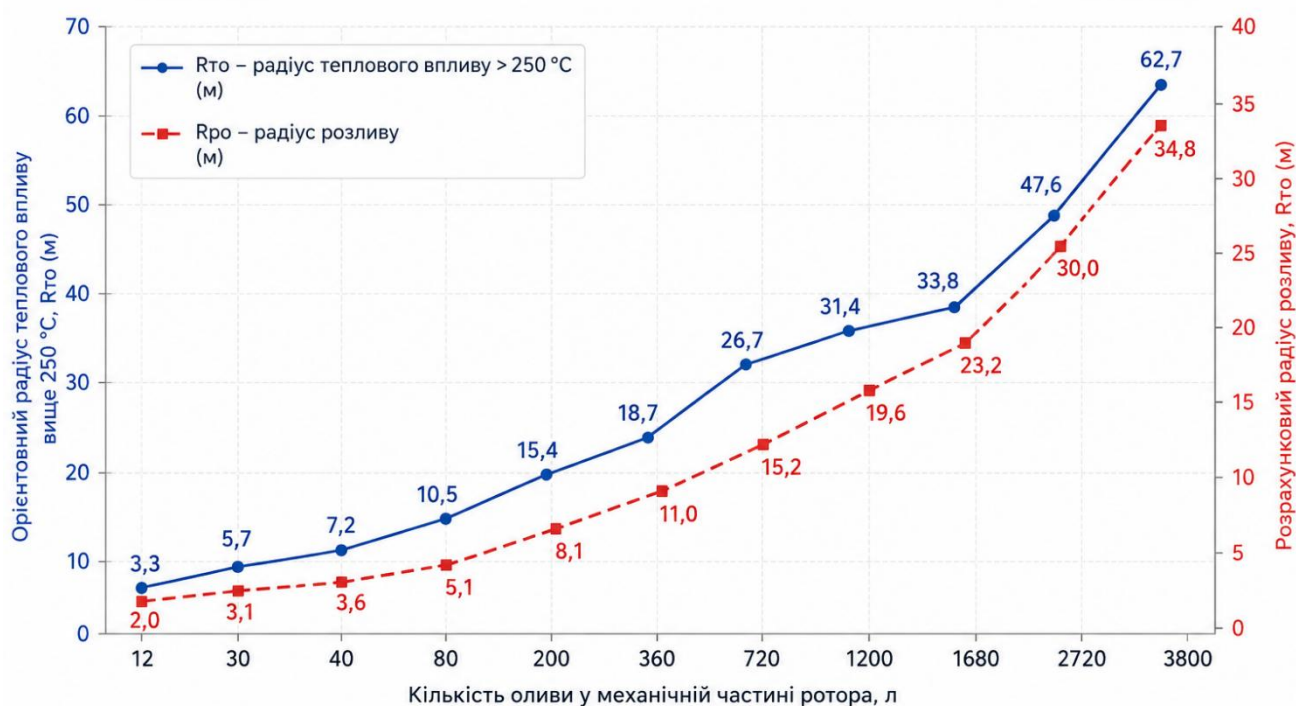


Рисунок 4.20 – Експериментальні дані утворення небезпечного радіусу температурного впливу пожежі та розрахункового радіусу зони розливу оливи.

Отримані дані свідчать, що різниця значень відстані небезпечного радіусу теплового впливу пожежі з врахуванням впливу вітрового навантаження та радіус розрахункового розливу в результаті реалізації сценарію «Руйнування-пожежа» може становити до 45%, що значно впливає на кінцевий результат визначення безпечних протипожежних відстаней. При цьому слід розуміти, що в кожному окремому розрахунковому випадку утворення радіусу теплового впливу пожежі слід враховувати реальні топографічні характеристики місцевості та питому теплоту згоряння того чи іншого типу оливи, яка знаходиться в корпусі ротора ВЕУ. Врахування питомої теплоти згорання оливи при визначенні значення безпечної протипожежної відстані від ВЕУ є ключовою характеристикою, що визначає енергетичний потенціал пожежної навантаги об'єкту.

4.4 Удосконалення методу оцінювання небезпеки поширення пожежі від вітрових електроустановок

В основі існуючих методологічних підходів визначення протипожежних відстаней закладено принципи аналізу процесів теплового випромінювання, конвекційного теплообміну, а також імовірнісних характеристик розвитку пожежі та її впливу на суміжні об'єкти [41, 112]. Основою створення методів визначення протипожежних відстаней є теплофізична теорія поширення пожежі, відповідно до якої основним критерієм безпеки виступає гранично допустима щільність теплового потоку або температура, що не спричиняє займання або руйнування конструкцій суміжно розташованого об'єкта. Для цього, як правило, використовується розрахунок інтенсивності теплового випромінювання від джерела горіння з урахуванням його геометричних параметрів, виду пального матеріалу, температури полум'я та коефіцієнтів поглинання й відбиття теплового випромінювання в атмосфері.

Другим важливим напрямом оцінювання небезпеки поширення пожежі між об'єктами є ймовірнісно-статистичний підхід, який базується на аналізі статистики пожеж, моделюванні сценаріїв розвитку вогню та оцінюванні ризику ураження об'єктів, що розташовані поблизу. Саме такий аналіз дозволив визначити, що для ВЕУ найбільш несприятливим сценарієм виникнення та розвитку пожежі є «руйнування-пожежа». Цей підхід дозволяє не лише враховувати фізичні закономірності процесів горіння, а й оцінювати реальний рівень небезпеки з позицій прийнятного ризику для даного типу об'єктів.

Таким чином, існуючі методологічні підходи щодо визначення безпечних протипожежних відстаней базуються на поєднанні трьох наукових засад:

- теплофізичні процеси горіння та теплопередачі;
- ризик-орієнтовні підходи оцінювання пожежонебезпечних сценаріїв;
- системне врахування просторово-планувальних і функціональних факторів.

Поєднання цих підходів створює наукову основу для розроблення сучасних нормативів та методик, що відповідають принципам технічного регулювання на

основі оцінки ризиків і забезпечують ефективний рівень пожежної безпеки при плануванні територій.

Розрахунковий метод оцінювання протипожежних відстаней із використанням рівняння променистого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності передбачає визначення розрахункової температури на поверхні суміжного об'єкту будівництва, що опромінюється теплом (T_p), що визначається за рівнянням теплопередачі, яке засноване на використанні рівняння нестационарної теплопровідності, яке має вигляд [40]:

$$c_p \rho \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T_p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T_p}{\partial z} \right). \quad (4.1)$$

де t – тривалість теплового опромінювання, с;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу або речовини у будинку, що сприймає тепло від пожежі у суміжному об'єкті будівництва, Вт/(м·°C);

c_p – питома теплоємність матеріалу або речовини у будинку, що сприймає тепло від пожежі у суміжному об'єкті будівництва, Дж/(кг·°C);

ρ – густина матеріалу або речовини у будинку, що сприймає тепло від пожежі суміжного об'єкту будівництва, кг/м³.

Рівняння променистого теплообміну між первинним осередком пожежі та поверхнею фасаду (конструкції) суміжного об'єкту визначають шляхом вирішення інтегрального рівняння, що має такий вигляд [40]:

$$\sum_{j=1}^N (\delta_{ij} - \varphi_{ij}) \sigma \theta_j^4 = \sum_{j=1}^N \frac{1}{A_j} \left(\frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_j} - \varphi_{ij} \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_j} \right) q_j \quad (4.2)$$

де δ_{ij} – коефіцієнт, що дорівнює 1 при $i = j$, та 0 в інших випадках;

i, j – кількість елементів, на які розбивається поверхня, що випромінює тепло та опромінюється теплом відповідно;

q_j – кількість теплоти, що передається від i поверхні, до j поверхні;

$\varphi_{i,j}$ – променевий кутовий коефіцієнт опромінювання, що залежить від взаємного розташування і та j поверхонь об'єктів, який визначають, як [40]:

$$\varphi_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\beta_i \cos\beta_j}{\pi r^2} dA_j dA_i \quad (4.3)$$

де β – кут між нормаллю до елемента і лінією, яка з'єднує елементи і та j;

r – відстань між центрами елементів і та j, м;

A_i, A_j – площа елементів поверхонь, що випромінюють тепло та опромінюються теплом відповідно, м².

Заключним етапом стандартного розрахунку протипожежної відстані із використанням рівняння променистого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності є визначення на кожній площині поверхні розрахункової області значення теплового потоку за формулою [40]:

$$\lambda \frac{\partial T_{pj}}{\partial r_j} \Big|_{r_j} = q_j \quad (4.4)$$

Водночас, наявна методологія визначення безпечних протипожежних відстаней від вітрової електроустановки до суміжно розташованих об'єктів не враховує визначений найбільш небезпечний сценарій «руйнування-пожежа», який значно впливає на значення параметру r – відстань між центрами елементів і та j, м. Таким чином, пропонується на основі проведених досліджень та визначених параметрів, які характеризують небезпеку поширення пожежі для даного типу об'єктів враховувати уточнюючі емпіричні коефіцієнти r_1 і r_2 . Таким чином, розрахункова протипожежна відстань R_{mod} для випадку визначення безпечної протипожежної відстані від вітрової електроустановки до суміжного об'єкту матиме вигляд:

$$R_{mod} = r + r_1 + r_2 \quad (4.5)$$

де, r_1 – фактична висота вітрової електроустановки;

r_2 - орієнтовний радіус теплового впливу вище 250 °С, що залежить від кількості оливи в корпусі ВЕУ та приймається згідно даних наведених в таблиці 4.1 або графіку рисунку 4.20 цього розділу.

А променевий кутовий коефіцієнт опромінювання, що залежить від взаємного розташування i та j поверхонь при розрахунку протипожежних відстаней для вітрових електроустановок матиме вигляд:

$$\varphi_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\beta_i \cos\beta_j}{\pi R_{mod}^2} dA_j dA_i \quad (4.6)$$

Існуючі методики оцінювання небезпеки поширення пожежі від ВЕУ, що базуються на загальних положеннях теплотехнічних моделей або нормативних значеннях протипожежних відстаней, не повною мірою враховували вплив висотного фактору та енергетичного потенціалу горіння оливовмісних компонентів і горючих матеріалів [113]. Враховуючи це, розрахункові моделі можуть суттєво занижувати рівень теплового впливу на навколишні об'єкти та території, а відповідно неякісно оцінити потенційні пожежонебезпечні ризики.

Запропонований удосконалений метод оцінювання небезпеки поширення пожежі враховує фактичну висоту розташування осередку горіння у гондолі ВЕУ та кількість пожежної навантаги, що може впливати на процеси утворення та поширення горіння. Такий підхід дозволяє більш точно визначати потенційну теплову потужність джерела пожежі, а також радіус теплового впливу з урахуванням напрямку вітру, турбулентності потоку та висотного розподілу теплових потоків .

Врахування висоти ВЕУ є особливо важливим, оскільки при горінні на значній висоті відбувається інтенсифіковане поширення полум'я під дією вітрових потоків і збільшення дальності розльоту палаючих фрагментів оливи, що суттєво підвищує ризик вторинних осередків займання. Моделювання таких

процесів показує, що для ВЕУ висотою понад 100 м зона потенційного термічного ураження може перевищувати встановлені розрахункові відстані в 1,5–2 рази.

Ключовою перевагою представленого удосконаленого методу є можливість динамічного врахування індивідуальних параметрів конкретної установки – висоти вежі, типу редуктора, складу оливи, маси пального матеріалу та умов навколишнього середовища. Це забезпечує перехід від усереднених нормативних значень до ризик-орієнтованих оцінок, що відповідають сучасним принципам технічного регулювання та стандартам безпеки ЄС.

Крім того, удосконалений метод створює передумови для:

- оптимізації протипожежних відстаней між ВЕУ та іншими об'єктами інфраструктури;
- обґрунтування ефективних систем пожежного моніторингу та аварійного реагування;
- моделювання сценаріїв вторинного займання суміжно розташованих об'єктів;
- підвищення надійності проєктних рішень у межах комплексної системи забезпечення пожежної безпеки ВЕС.

Таким чином, удосконалений метод оцінювання небезпеки поширення пожежі, що враховує фактичну висоту ВЕУ та кількість оливи в корпусі гондоли, має суттєві переваги над традиційними підходами. Він забезпечує більш точне прогнозування наслідків пожежі, підвищує рівень обґрунтованості протипожежних заходів і сприяє зменшенню екологічних та техногенних ризиків при експлуатації сучасних вітрових електроустановок.

4.5 Оцінка економічного ефекту на прикладі об'єкту будівництва

Оцінка економічного ефекту в будівництві ВЕС із врахуванням вимог щодо протипожежних відстаней є важливим етапом планування та реалізації проєкту та дозволяє оптимізувати витрати на етапі капітального будівництва. Під час оцінювання економічного ефекту, на кінцевий результат оцінювання впливають наступні чинники:

- щільність розміщення ВЕУ;

- вартість землевідведення;
- конфігурація прокладання кабельних мереж,
- обсяги будівельно-монтажних робіт.

Серед експлуатаційних витрат варто відзначити втрати енергії в електричних мережах, що можуть досягати 5-10% через втрати в ізоляції мереж, опір провідників та втрати в трансформаторах [114].

Таким чином, застосовуючи раціональні протипожежні відстані під час проектування місць розміщення ВЕС, вирішується не тільки питання протипожежного захисту об'єкту енергетики, але і оптимізація економічної складової проекту в цілому. Для оцінювання економічного ефекту, розглянемо типовий приклад розміщення ВЕУ при застосуванні існуючих підходів ДСТУ [41] та модифікованої методології визначення протипожежних відстаней, яка враховує висоту ВЕУ та кількість оливи в середині корпусу ротора.

Приймаємо наступні вихідні умови та сценарій пожежонебезпечної ситуації для проведення оцінювання: ВЕУ висотою 150 м з кількістю рідких горючих речовин (оливи) в середині корпусу гондоли 2500 л, при цьому площа монтажної частини фундаменту опори ВЕС становить 50 м². Тип топографічного характеру місцевості – рівнинна місцевість, тип ґрунту піщаний, проте коефіцієнт фільтраційного поглинання палива не враховується для імітації найбільш несприятливих умов пожежі. Площу потенційного розливу визначимо за формулою:

$$S = \frac{V}{H} \quad (4.7)$$

де S — площа розливу (м²),

V — об'єм рідини (м³),

H — середня товщина шару (м).

Приймаємо орієнтовну товщину шару в 0,001 м і таким чином отримуємо потенційну площу розливу в 2500 м² або якщо виразити площу розливу через форму кола, то радіус такого розливу складатиме в межах 28,2 м.

Слід відзначити, що під час проведення розрахунків потенційну можливість ефекту відскоку (оцінку висоти відскоку) корпусу не враховано, оскільки враховуючи значну масу роторної частини ВЕУ (більше 70 тон) [115], а також деформацію металеві частини корпусу ротору ВЕУ, найбільш вірогідним є сценарій певного розльоту уламків, які здебільшого виготовлені з негорючих матеріалів. Таким чином загальна основна зона осередку пожежі після падіння роторної частини та розливу оливи фактично не відрізнятиметься від сценарію розливу палива із автоцистерни з аналогічним об'ємом, яка перевернулася.

Прийнявши дані вихідні параметри для проведення розрахунків застосуємо запропонований метод оцінювання протипожежних відстаней та порівняємо економічний ефекти із розпорядчим методом нормування для оцінювання економічного ефекту на прикладі об'єкту будівництва.

Економічний ефект E визначається як різниця між очікуваними (математичними) збитками для базового (нормативного) та удосконаленого варіанта оцінювання:

$$E = NPV_{\text{баз}} - NPV_{\text{удосконал}} \quad (4.8)$$

Для простоти економічної моделі ми розкладаємо NPV кожної альтернативи варіанту на суму:

- очікуваних річних втрат від пожежі (включаючи прямі збитки обладнанню та втрати виробітку), дисконтованих на період експлуатації;
- відкладених/одноразових капітальних змін (зеконормлені капітальні витрати через оптимізацію просторового планування або додаткові витрати на впровадження методу).

В моделі використовуються такі позначення:

- N — кількість турбін у парку;

- p_b — річна ймовірність виникнення події пожежі з поширенням (для базового методу, на одну турбіну);
- p_u — відповідна ймовірність для удосконаленого методу;
- L_b — середні прямі збитки при події (валюта: USD) у базовому випадку (включає відновлення згорілої турбіни та середні вторинні збитки);
- L_u — відповідні середні збитки при події для удосконаленого методу;
- C_{capex} — одноразові капітальні заощадження (наприклад, зниження потреби в ділянках землі/дорогах) завдяки оптимізації;
- C_{impl} — одноразові витрати на впровадження (моделювання, сенсори, навчання);
- r — дисконтна банківська ставка (річна);
- n — строк аналізу (років).

Очікувані річні збитки виразимо залежностями:

$$A_b = N \cdot p_b \cdot L_b, \quad A_u = N \cdot p_u \cdot L_u \quad (4.9)$$

Річна економія від зниження ризику:

$$\Delta A = A_b - A_u \quad (4.10)$$

Чиста приведена вартість (NPV) економії від потенційних річних збитків:

$$NPV_{\text{annual}} = \Delta A \cdot \frac{1 - (1 + r)^{-n}}{r} \quad (4.11)$$

З урахуванням одноразових капітальних змін:

$$NPV_{\text{total}} = NPV_{\text{annual}} + (C_{\text{capex}} - C_{\text{impl}}) \quad (4.12)$$

Таким чином, проведемо розрахунок економічного ефекту для парку турбін з кількістю вітрових електроустановок $N=30$. Середні прямі збитки при одиночній події (базовий): $L_b=3\,900\,000$ USD (включає заміну гондоли/редуктора/ремонт лопатей і середні вторинні ушкодження, станом на 2025 рік). При цьому, середні прямі збитки при одиночній події (удосконалений): $L_u=3\,300\,000$ USD (з урахуванням зменшеної ймовірності масштабного поширення пожежі) [116].

Річна ймовірність події виникнення пожежі за сценарієм «Руйнування-пожежа» з поширенням на одну турбіну (базова): $p_b=0,002$ (0,2 % на турбіну/рік), що обумовлюється статистичними даними на основі спостережень за період 1995-2020 роки.

Річна ймовірність події з поширенням при удосконаленому методі: $p_u=0.0012$ (зниження на 40 % завдяки кращому розрахунку зон та конструкторським/організаційним заходам).

- строк аналізу: $n = 25$ років;
- дисконтна ставка: $r = 0,06$ (6 %);
- одноразові капітальні заощадження (оптимізація протипожежних відстаней, дорожньої інфраструктури тощо): $C_{\text{carex}} = 2\,000\,000$ USD.

Витрати на впровадження методу (моделі, системи спостереження, навчання персоналу): $C_{\text{impl}} = 300\,000$ USD.

Слід розуміти, що для реального проєкту всі наведені величини слід уточнювати за фактичними даними замовника, страхової компанії та виробника ВЕУ. Таким чином, очікувані потенційні річні збитки для базового варіанту можна виразити залежністю:

$$A_b = N \cdot p_b \cdot L_b = 234\,000 \text{ USD} \quad (4.13)$$

Річні очікувані збитки для удосконаленої методики можливо виразити:

$$A_u = N \cdot p_u \cdot L_u = 118\,800 \text{ USD} \quad (4.14)$$

Таким чином, річна економія від зниження ризику становитиме:

$$\Delta A = A_b - A_u = 234\,000 - 118\,800 = 115\,200 \text{ USD/рік} \quad (4.15)$$

Приведена вартість річної економії для даної ВЕС за рівнянням 4.10 становитиме:

$$NPV_{\text{annual}} = 1\,472\,642 \text{ USD} \quad (4.16)$$

З урахуванням одноразових капітальних змін, вартість проєкту становитиме:

$$C_{\text{net}} = C_{\text{capex}} - C_{\text{impl}} = 1\,700\,000 \text{ USD} \quad (4.17)$$

Загальна отримана користь (NPV) матиме вигляд:

$$NPV_{\text{total}} = NPV_{\text{annual}} + C_{\text{net}} = 3\,172\,642 \text{ USD} \quad (4.18)$$

Таким чином, економічна привабливість, а саме безпосередній економічний ефект наведеному прикладі впровадження удосконаленого методу визначення протипожежних відстаней дає позитивну чисту вартість в межах 3,17 млн USD при 25-річному діапазоні аналізу та дисконтній ставці 6 %. Це означає, що капітальні витрати на реалізацію методу самоокупаються через зниження ймовірності масштабної шкоди та прямих заощаджень у структурі капітальних витрат (земля, інфраструктура). Окрім порівняння витрат щодо вартості землі, що є буфером для забезпечення протипожежної відстані між об'єктами, варто врахувати капітальні витрати на прокладання електромереж (підземним способом), що є частиною інфраструктури комплексу ВЕС. Згідно відкритих джерел, орієнтовна вартість робіт підземного прокладання силового кабелю живлення складає в межах 25 млн грн за 1 км [117].

Висновки за розділом IV

1. Обґрунтовано вихідні умови та порядок реалізації програми-методики проведення досліджень процесів поширення пожежі від вітрових електроустановок визначених типів в досліджуваному просторі із застосуванням газо-гідродинамічних моделей, які засновані на закономірностях тепломасопереносу, описаних рівняннями Нав'є-Стокса для низькошвидкісних температурно-залежних потоків під час полуменевого горіння.

2. На основі проведених попередніх натурних вогневих досліджень створено обчислювальну газо-гідродинамічну модель для чотирьох груп вітрових електроустановок, що враховує фактичну висоту несучої опори, місце потенційного розташування осередку горіння за сценарієм аварії «руйнування-пожежа» та потенційну зону утворення і подальшого поширення пожежі. Такий підхід дозволив більш точно оцінити потенційну теплову потужність джерела пожежі, а також радіус температурного впливу з урахуванням напрямку вітру, турбулентності потоку та висотного розподілу теплових потоків.

3. За результатом проведених етапів моделювання за сценарієм «руйнування-пожежа», отримано експериментальні дані, щодо потенційного небезпечного радіусу дії температурного впливу з врахуванням вітрового навантаження 10 м/с в сторону суміжно розташованого об'єкту для визначених типів ВЕУ. Отримані залежності демонструють, що різниця значень між розрахунковим радіусом розливу оливи та орієнтовним радіусом температурного впливу вище 250 °С, може становити в межах 74-112% в залежності від типу ВЕУ.

4. Удосконалено метод оцінювання небезпеки поширення пожежі від вітрових електроустановок, що враховує фактичну висоту ВЕУ, кількість оливи в корпусі гондоли та враховує просторові параметри середовища. Удосконалений підхід забезпечує більш точне прогнозування наслідків пожежі, підвищує рівень обґрунтованості протипожежних заходів і сприяє зменшенню екологічних та техногенних ризиків при експлуатації сучасних вітрових електроустановок.

5. Оцінка економічного ефекту застосування удосконаленого методу оцінювання небезпеки поширення пожежі від вітрових електроустановок

підтверджує, що початкові капітальні витрати на реалізацію методу є виправданими та самоокупними за рахунок зниження ймовірності масштабних збитків, оптимізації використання земельних ресурсів і скорочення витрат на інфраструктуру. Додатковим фактором економічної привабливості є можливість зменшення витрат на прокладання інженерних мереж, зокрема підземних електромереж, вартість яких може сягати близько 25 млн грн за 1 км, що посилює загальну позитивну фінансову оцінку для проєктів ВЕС.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації, яка є завершеним науковим дослідженням, вирішено актуальне наукове завдання щодо розкриття закономірностей впливу параметрів вітрових електроустановок на можливість поширення пожежі на суміжні об'єкти, що стало науковим підґрунтям удосконалення методу оцінювання небезпеки поширення пожежі та визначення безпечних протипожежних відстаней. За результатами проведених досліджень отримано такі основні результати:

1. Проаналізовано сучасний стан пожеж на вітрових електроустановках та встановлено, що пожежі становлять близько 7,7 % від загальної кількості аварій на вітрових електроустановках, а конструктивні особливості, тип обладнання, потужність і технічні параметри вітрових турбін суттєво впливають на ймовірність виникнення та поширення пожежі на суміжні об'єкти. Виявлено відсутність у чинних нормативних документах і рекомендаціях виробників методик визначення безпечних протипожежних відстаней, що зумовлює необхідність удосконалення методів оцінювання небезпеки поширення пожежі від вітрових електроустановок.

2. Розроблено модель визначення безпечних протипожежних відстаней, яка враховує температурний вплив пожежі від вітрових електроустановок у разі їх аварійного падіння та усуває недоліки існуючих математичних моделей і розрахункових методів оцінювання поширення пожежі між суміжно розташованими об'єктами. Встановлено, що за швидкості вітру понад 10 м/с радіус зони температур понад 250 °С може перевищувати радіус розливу оливи до 45 %, а врахування зовнішніх факторів забезпечує підвищення достовірності прогнозування процесів горіння та поширення пожежі.

3. Проведено комп'ютерне моделювання процесів розвитку та поширення пожежі на суміжні об'єкти у разі падіння вітрової електроустановки. Вперше встановлено закономірність формування зони пожежі під час аварійного падіння та розгерметизації оливовмісного корпусу вітрової електроустановки, яка на відміну від існуючих підходів, враховує сукупний вплив конструктивних параметрів установки та вітрового навантаження на геометричні характеристики

зони пожежі, що дало змогу встановити перевищення відстані до найбільш віддаленого краю зони пожежі над геометричною висотою опори до 56 % та підвищити достовірність оцінювання небезпеки поширення пожежі.

4. Створено програму-методику експериментального дослідження процесів розвитку пожежі під час аварійного падіння вітрової електроустановки, що супроводжується пожежею в результаті руйнування корпусу гондоли та аварійного розливу оливи за найбільш несприятливих умов. Обґрунтовано необхідний перелік засобів вимірювальної техніки та розроблено експериментальну базу для проведення досліджень із використанням імітаційної моделі вітрової електроустановки потужністю до 2 кВт із запасом оливи до 20 л. Розроблено експериментальну установку моделі вітрової електроустановки та проведено серію експериментальних досліджень впливу її конструктивних параметрів на характер та динаміку процесів розвитку пожежі у випадку її аварійного падіння. Встановлено, що площа пожежі зі сталим температурним режимом у межах 500–600 °С змінюється від 12 м² до 7 м² при тривалості горіння до 11 хвилин. Отримані дані стали основою для формування довідкової таблиці емпіричних значень та удосконалення розрахунково-табличного методу визначення протипожежних відстаней.

5. Розроблено удосконалений метод оцінювання небезпеки поширення пожежі від вітрових електроустановок на основі емпіричних даних, що дало змогу теоретично обґрунтувати та експериментально підтвердити зменшення площі початкового осередку пожежі, спричиненої падінням і розливом оливи з гондоли, у 2,4–2,8 рази протягом перших 10 хвилин горіння. Встановлено, що найбільш небезпечним періодом розвитку пожежі є інтервал від 2-ї до 10-ї хвилини, а максимальна відстань до найбільш віддаленої зони, ураженої вогнем, може перевищувати геометричну висоту вітрової електроустановки до 56 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Turbine Accident Statistics. *Scotland Against Spin*. URL: <https://scotlandagainstspin.org/turbine-accident-statistics/>.
2. Liu L. et al. The Swedish Maintenance and Services Market in Wind Power Industry : Lessons Learned and Opportunities for Chinese Service Providers. *International Conference on Advances in Social Science, Humanities, and Management*. Guangzhou, China, 14–15 December 2013. pp. 133-138.
3. У Чаплинському районі на вітроелектростанції сталося загорання. *Новини Херсонщини*. URL: <https://firstregion.com.ua/novyny-hersonshhyny/u-chaplynskomu-rajoni-na-vitroelektrostantsiyi-stalosya-zagorannya/>.
4. На Миколаївщині горіла гондола вітряка. *Новини Н*: URL: <https://novosti-n.org/ua/news/Na-Mykolayivshhyni-gorila-gondola-vitryaka-250323>.
5. «Зелена» енергетика повинна перемогти нафту й газ агресора. *Будексперт*. URL: <http://www.budexpert.ua/content/detail/1314>.
6. *Losheim – gigantische Aufnahmen: Windrad wird zur Glitzer-Fackel. Bild.de*. URL: <https://www.bild.de/regional/saarland/saarland-news/losheim-gigantische-aufnahmen-windrad-wird-zur-glitzer-fackel-82387558.bild.html>.
7. *Пожжежа вітряка на висоті 160 метрів у Великопольському воєводстві InPoland.net.pl*. URL: <https://inpoland.net.pl/novosti/pozhezha-vitryaka-na-visoti-160-metriv-u-velikopolskomu-voehvodstvi-gasiti-dovelosya-vertolotom-foto-video>.
8. Turbine fires a burning issue for the industry. *Recharge News*. URL: <https://www.rechargenews.com/wind/turbine-fires-a-burning-issue-for-the-industry/1-1-1185510>.
9. Wang, Y., Zhupanska, O. I. Estimation of the electric fields and dielectric breakdown in non-conductive wind turbine blades subjected to a lightning stepped leader. *Wind Energy*. 2017. vol. 20. issue 5. P. 927–942.
10. Правила проектування вітряних електричних станцій ГКД 341.003.001.002-2000 [Чинний від 2000-08-01]. – К. *Мінпалива та енергетики* від 13.09.2000 № 421. – 50 с.

11. Ertek, G.; Kailas, L. Analyzing a Decade of Wind Turbine Accident News with Topic Modeling. *Sustainability* 2021, 13, 12757.

12. Nizhnyk, V., Skorobahatko, T., Mykhailov, V., Ballo, Y., Sereda, D., Kovalyshyn, B. et al. (2024). Current state of research and normative framework regarding assessment of fire alarm systems suitability for operation *AD ALTA: Journal of Interdisciplinary Research*, 1, 245–248.

13. Uadiale, S.; Urbán, E.; Carvel, R.; Lange, D.; Rein, G. Overview of Problems and Solutions in Fire Protection Engineering of Wind Turbines. *Fire Saf. Sci.* 2014, 11, 983–995.

14. Butler, B. W., Webb, J., Hogge, J., & Wallace, T. (2014, May). Vegetation clearance distances to prevent wildland fire caused damage to telecommunication and power transmission infrastructure. In Fires Conference (p. 257)

15. SAFETY OF WIND SYSTEMS, URL: <https://windfarmaction.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/10/safety-of-wind-systems.pdf>.

16. Mou, J., Jia, X., Chen, P., & Chen, L. (2021). Research on operation safety of offshore wind farms. *Journal of marine science and engineering*, 9(8), 881.

17. Cicione, A., Walls, R., Sander, Z., Flores, N., Narayanan, V., Stevens, S., & Rush, D. (2021). The effect of separation distance between informal dwellings on fire spread rates based on experimental data and analytical equations. *Fire technology*, 57, 873-909.

18. Yun, H. S., Nam, D. G., & Hwang, C. H. (2020). An Experimental Study on the Fire Spread Rate and Separation Distance between Facing Stores in Passage-Type Traditional Markets. *Energies*, 13(17), 4458.

19. Pesic, D., Zigar, D., Raos, M., & Anghel, I. (2017). Simulation of fire spread between residential buildings regarding safe separation distance. *Tehnički vjesnik*, 24(4), 1137-1145.

20. Серєда Д. В., Балло Я. В. Удосконалення розрахункового методу визначення протипожежних відстаней для вiтрових електроустановок. *Пожєжна*

безпека = Fire Safety: зб. наук. пр. 2024. Т. 45. С. 71–80. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.09>.

21. Вітроенергетика. Вітроенергетичні установки та вітроелектричні станції. Терміни та визначення понять ДСТУ 3896-2007 [Чинний від 2009-01-01]. – К. ДНПП «Укренергомаш» від 05.11.2007 № 297. – 24 с.

22. Vortex Bladeless – вітрові електроустановки без лопатей. IT-MAX URL: https://it-max.com.ua/blog/vortex_bladeless__vetryanye_turbiny_bez_lopastej

23. Серета Д.В., Балло Я.В. Аналіз пожежної небезпеки вітроелектростанцій. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності*: Зб. наук. праць XVII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів. Львів: ЛДУБЖД, 2022. С. 31–34

24. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація ДСТУ 8829:2019 [Чинний від 2020-01-01]. – К.: УкрНДНЦ. – 78 с.

25. Климаць Р.В. Удосконалення методу прогнозування припинення та поширення горіння системою вогнеперешкоджання на маслонаповнених трансформаторних підстанціях: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 21.06.02/Климаць Руслан Володимирович; Львів. держ. ун-т безпеки життєдіяльності. – Львів, 2022.– 25 с.

26. Gear Oil Wind Turbine, Vestas V52-850 kW, Gearbox Upgrade URL: https://iqoil.co.za/wp-content/uploads/2020/05/WIND_G1-1.pdf.

27. Hydraulic Oil Wind Turbine, Vestas V90-2MW, Pitch Hydraulic System URL: https://iqoil.co.za/wp-content/uploads/2020/05/Wind_Hydraulic-Oil_Wind-Turbine-Vestas-V90-2MW-Pitch-Hydraulic-System_OXHULT_ASWI9007-UK.pdf.

28. Планування та забудова територій. ДБН Б.2.2-12:2019 [Чинний від 2019-10-01]. – К.: Мінрегіон України, 2019. – 177 с. – (Державні будівельні норми України).

29. Правила улаштування електроустановок. [Чинні від 2017-08-21]. – К.: Міненерговугілля України від 21.07.2017 № 476. – 614 с.

30. Правила пожежної безпеки в Україні: Наказ Міністерства внутрішніх справ України від 30.12.2014 № 1417 *Офіційний вісник України*. 2015 р., № 26, Ст. 767.

31. Wind turbines - Fire protection guideline VdS 3523:2008. Windenergieanlagen (WEA) - Leitfaden für den Brandschutz. German. p. 24.

32. Про ринок електричної енергії. Закон України від 13 квітня 2017 р. № 2019-VIII *Відомості Верховної Ради України*. 2017. № 27-28, Ст. 5.

33. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо удосконалення містобудівної діяльності. Закон України від 17 січня 2017 р. № 1817-VIII *Відомості Верховної Ради України*. 2017. № 9, Ст. 68.

34. Будівлі та споруди. Визначення класу наслідків (відповідальності). ДСТУ 8855:2019 2019 [Чинний від 2019-12-01]. – К.: УкрНДНЦ. – 13 с.

35. Про регулювання містобудівної діяльності. Закон України від 17 лютого 2011 р. № 3038-VI *Відомості Верховної Ради України*. 2017. № 34, Ст. 343.

36. Про оцінку впливу на довкілля. Закон України від 23 травня 2017 р. № 2059-VIII *Відомості Верховної Ради України*. 2017. № 29, Ст. 315.

37. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги ДБН В.1.1.7:2016 [Чинний від 2017-06-01]. – К.: Мінрегіон України, 2017. – 47 с.

38. Про затвердження Технічного регламенту будівельних виробів (продукції). Постанова Кабінету Міністрів від 20 грудня 2006 р. №1764. *Офіційний вісник України*. 2006. №51 Ст. 145.

39. Ніжник, В. В., Поздєєв, С. В., Жартовський, С. В., & Фещук, Ю. Л. (2019). Оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти за критерієм теплового потоку. *Міжнародний науковий журнал: Інтернаука*. К, (11), 73.

40. Ніжник В. В. Розвиток наукових основ оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти: дис. ... д-ра наук: 21.06.02 : Харків, 2020. 409 с.

41. Пожежна безпека. Визначення протипожежних відстаней між об'єктами розрахунковими методами. Основні положення ДСТУ 9058:2020 [Чинний від 2021-05-01]. – К.: УкрНДНЦ. – 24 с.

42. Ніжник В. В. Підходи щодо визначення протипожежних відстаней між будинками та спорудами/ Сучасні проблеми архітектури та містобудування: Наук.-техн. збірник / Відпов. ред. М.М. Дьомін. – К., КНУБА, 2019. – Вип. 53. – 360 с.

43. Борисова А.С. Удосконалення розрахункового методу прогнозування поширювання пожежі на сусідні об'єкти з урахуванням вітрового впливу. – Львівський державний університет безпеки життєдіяльності ДСНС України, Львів, 2021.

44. Law to change the Bavarian building regulations and the law on official organization construction, housing and water management *Bavarian Law and Ordinance Gazette*, 2014, URL: <https://www.verkuendung-bayern.de/gvbl/2014-478>.

45. Setback distance between wind turbines and dwellings: the new 10H rule protects residents in Bavaria URL: <http://en.friends-against-wind.org/realities/10h-regel>.

46. PUBLIC SAFETY OF INDUSTRIAL WIND POWER PLANTS. URL: <http://en.friends-against-wind.org/doc/Dossier-Risques-eoliens.pdf>.

47. Recommended Practice for Fire Protection for Electric Generating Plants and High Voltage Direct Current Converter Stations. NFPA 850. Quincy: National Fire Protection Association, 2020. 86 p.

48. Aerogeneradores (I): funcionamiento y marco normativo de prevención de riesgos laborales. NTP 1022. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, 2014. 6 p.

49. Aerogeneradores (II): Riesgos laborales en las operaciones de mantenimiento NTP 1023. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, 2014. 8 p.

50. Aerogeneradores (III): Medidas de prevención y protección durante el mantenimiento. NTP 1023. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, 2014. 10 p.

51. Машини та механізми Директива 2006/42/ЄС від 17.05.2006.

52. Modak A. T. Thermal radiation from pool fires. *Combustion and Flame*. 1977. Vol. 29. P. 177–192.

53. Heskestad, G. (1999). Turbulent jet diffusion flames: consolidation of flame height data. *Combustion and Flame*, 118(1-2), 51-60.

54. Heskestad, C. (1973). Modeling of enclosure fires. *In Symposium (International) on combustion*. Vol. 14, №. 1, pp. 1021-1030.

55. Heskestad, G. (1998). Dynamics of the fire plume. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 356(1748), pp. 2815-2833.

56. Hirschler M. M. Fire Performance of Organic Polymers, Thermal Decomposition, and Chemical Composition. *ACS Symposium Series*. Washington. 2001. P. 293–306.

57. Beyler, C. L. (2016). Fire hazard calculations for large, open hydrocarbon fires. *SFPE handbook of fire protection engineering*, pp. 2591-2663.

58. Fossa, M., & Tanda, G. (2008). Pool fire model comparison for radiation evaluation in case of fire in tank farms. *In Proceedings of CHT-08 ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer*. Begel House Inc.

59. Hirschler M. M. Fire Performance of Organic Polymers, Thermal Decomposition, and Chemical Composition. *ACS Symposium Series*. Washington, 2001. P. 293–306.

60. Mudan, K. S. (1984). Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires. *Progress in Energy and Combustion Science*, 10(1), pp. 59-80.

61. Beyler, C. L. (2002). Fire hazard calculations for large, open hydrocarbon fires. In P. J. DiNenno, et al. (Ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (3rd ed.). Quincy, MA: National Fire Protection Association.

62. Sloane, M. J. D. (2017). Fire effects on suspension bridge main cables: *Methods for determining both temperature and strain distributions within an exposed cable*. Columbia University.

63. Dayan, A., & Tien, C. L. (1976). Radiative transfer with anisotropic scattering in an isothermal slab. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 16(2), 113-125.

64. Кузик, А. Д. (2011). Моделювання пожежної небезпеки лісів. Науковий вісник НЛТУ України, 21(16), 104-112.

65. Серета Д.В., Балло Я.В. Аналіз моделі аварійного розтікання мастила від вітроелектроустановки. Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: Зб. наук. праць XVIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів. Львів: ЛДУ БЖД, 2023. С. 78-81.

66. Wang, Y., Gibson, L., Beshir, M., & Rush, D. (2021). Determination of critical separation distance between dwellings in informal settlements fire. *Fire Technology*, 987-1014.

67. Akay, A. E., Wing, M. G., Zengin, M., & Kose, O. (2017). Determination of fire-access zones along road networks in fire-sensitive forests. *Journal of Forestry Research*, 28(3), 557-564.

68. Абрамов Ю.О., Басманов О.Є., Олійник В.В. Моделювання розтікання горючої рідини внаслідок аварії на залізничному транспорті. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2021. № 1(33). С. 30-42.

69. Abramov Yu., Basmanov O., Krivtsova V., Salamov J. Modeling of spilling and extinguishing of burning fuel on horizontal surface // *Naukovyi Visnyk NHU*. 2019. V. 4. P. 86–90. doi: 10.29202/nvngu/2019-4/16.

70. A.Sivasakthi, Dr.T.Nagalakshmi (2018). Characterization of Heavy Crude Oil Through Physical And Chemical Properties. *International Journal for Science and Advance Research In Technology*. Vol. 4. Issue 3. pp. 1379-1382.

71. Iloeje A. F., Aniago V. (2016). Effect of Crude Oil on Permeability Properties of the Soil. *International Journal for Science and Advance Research In Technology*. Volume 1(1). pp. 39-43.
72. M.G. Kesler, B.I. Lee. (1976) Improve predictions of enthalpy of fractions. *Hydro-carbon Processing*, pp. 153–158.
73. C.S. Cragoe (1929). Thermal properties of petroleum products. Bur. standards, Misc. Publication, № 97.
74. K. Aziz, A.B. Ramesh, and P.T. Woo. (1995)/ Fourth spe comparative solution project: Comparison of steam injection simulators. *Journal of Petroleum Technology*, 39(12). pp. 1576–1584.
75. Ramires, M. L., Nieto de Castro, C. A., Nagasaka, Y., Nagashima, A., Assael, M. J., & Wakeham, W. A. (1995). Standard reference data for the thermal conductivity of water. *Journal of physical and chemical reference data*, 24(3), pp. 1377-1382.
76. Гільчук, А., Халатов, А., & Доник, Т. (2022). Теорія теплопровідності.
77. Константинов С.М. Теплообмін: підручник. Київ: ВПІ ВПК «Політехніка», 2005. 304 с.
78. CINDAS-LLC. Thermophysical properties of matter database. URL: <https://cindasdata.com/applications/tpmd/>, 2011.
79. L. R. Ingersoll and O. A. Коepp. (1924). Thermal diffusivity and conductivity of some soil materials. *Phys. Rev.*, 24(1):92–93.
80. Computer Modeling Group Ltd., 2010. Advanced Process and Thermal Reservoir Simulator, Version 2010, by Computer Modeling Group, Ltd., Calgary, CA.
81. Horai, K. I. (1971). Thermal conductivity of rock-forming minerals. *Journal of geophysical research*, 76(5), 1278-1308.
82. Dietz, P. W. (1979). Effective thermal conductivity of packed beds. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 18(3), 283-286.
83. McBride, B. J. (2002). NASA Glenn coefficients for calculating thermodynamic properties of individual species. National Aeronautics and Space Administration, John H. Glenn Research Center at Lewis Field.

84. K. Aziz and (1979). A. Settari. Petroleum Reservoir Simulation. *Applied Science Publishers Ltd*, London, UK.

85. Ambroz, M., Balažovjeh, M., Medl'a, M., & Mikula, K. (2019). Numerical modeling of wildland surface fire propagation by evolving surface curves. *Advances in Computational Mathematics*, 45(2), 1067-1103.

86. Vakalis, D., Sarimveis, H., Kiranoudis, C., Alexandridis, A., & Bafas, G. (2004). A GIS based operational system for wildland fire crisis management I. Mathematical modelling and simulation. *Applied Mathematical Modelling*, 28(4), 389-410.

87. Balažovjeh, M., & Mikula, K. (2011). A higher order scheme for a tangentially stabilized plane curve shortening flow with a driving force. *SIAM Journal on Scientific computing*, 33(5), 2277-2294.

88. Barrett, J. W., Garcke, H., & Nürnberg, R. (2010). Numerical approximation of gradient flows for closed curves. *IMA journal of numerical analysis*, 30(1), 4-60.

89. Benninghoff, H., & Garcke, H. (2014). Efficient image segmentation and restoration using parametric curve evolution with junctions and topology changes. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 7(3), 1451-1483.

90. Mikula, K., & Ševčovič, D. (2004). Computational and qualitative aspects of evolution of curves driven by curvature and external force. *Computing and Visualization in Science*, 6(4), 211-225.

91. Серєда Д.В., Балло Я.В. До питання процесів теплообміну між факелом пожежі електроустановки та суміжними об'єктами. *Problems of Emergency Situations: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2023. С. 145-146.

92. Ragheb, M. (2011). Safety of wind systems. Disponible à l'adresse <http://netfiles.uiuc.edu/mragheb/www/NPRE>.

93. Reddy, S. S. P., Suresh, R., MB, H., & Shivakumar, B. P. (2021). Use of composite materials and hybrid composites in wind turbine blades. *Materials Today: Proceedings*, 46, 2827-2830.

94. БТС-ІНЖИНІРИНГ. Вітрогенератор M-Series RX-2000M 2 кВт горизонтальний. URL: https://bts.net.ua/ua/alternative-energy-sources-and-generators/wind-power-generators/horizontal-wind-power-generators/v-trogenerator-m-series-rx-2000m-2-kvt-gorizontalniy/?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAh6y9BhBREiwApBLHC532XOdhes3ODVogENxrLOaCWYZyoxRJ8ckp3PCmOO_xTu4Xl_mXJBoCR5YQAvD_BwE

95. Про затвердження критеріїв утворення державних пожежно-рятувальних підрозділів (частин) оперативно-рятувальної служби цивільного захисту в адміністративно-територіальних одиницях та переліку суб'єктів господарювання, де утворюються такі підрозділи (частини) : Постановою КМУ від 27 листопада 2013 р. № 874 / Офіційний вісник України. 2013. №96. С.113. Ст. 3555.

96. Довідник керівника гасіння пожеж / П.А. Короткий та ін. ; за ред. В.С. Кропивницького. Київ : ТОВ «Літера-Друк», 2016. 320 с.

97. Серета Д.В., Балло Я.В. (2025). Методика дослідження поширення пожежі від вітрової електроустановки до суміжних об'єктів. Комунальне господарство міст. Серія: «Інформаційні технології та інженерія», 1(189), 377-383. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-377-383>.

98. Серета Д.В., Балло Я.В. (2025). Результати натурних вогневих досліджень розвитку пожежі під час аварійного падіння вітрової електроустановки. Комунальне господарство міст. Серія: «Інформаційні технології та інженерія», 4(192), 343-349. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-377-383>.

99. Балло Я.В., Серета Д.В. Експериментальні дослідження поширення пожежі від вітрових електроустановок до суміжних об'єктів. Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції, Львів: ЛДУБЖД, 2024. С. 61-631.

100. Fazeli, H., Jolly, W. M., & Blunck, D. L. (2022). Phases and Time-Scales of Ignition and Burning of Live Fuels. arXiv preprint arXiv:2203.04639.

101. Y.V. Ballo, A.V. Mykhailova, D.V. Sereda, I.G. Stylyk, O.O. Sizikov Assessment of the possible impact of wind generator fire on the environment. XVI International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment». Kyiv, 2022. Eage

102. McGrattan, K. B., Baum, H. R., Rehm, R. G., Hamins, A., Forney, G. P., Floyd, J. E., ... & Prasad, K. (2000). Fire dynamics simulator--Technical reference guide. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory

103. Plotnikov, P., & Sokołowski, J. (2012). Compressible Navier-Stokes equations: theory and shape optimization (Vol. 73). Springer Science & Business Media.

104. Iwaszczuk, N., Prytula, M., Prytula, N., Pyanylo, Y., & Iwaszczuk, A. (2022). Modeling of gas flows in underground gas storage facilities. *Energies*, 15(19), 7216.

105. Баранюк, О. В., Воробйов, М. В., & Рачинський, А. Ю. (2023). CFD-модельовання процесів теплообміну і гідродинаміки засобами програмного комплексу.

106. Windturbines database. URL: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines>.

107. Сенчихін, Ю. М., Сировий, В. В., Ліснюк, А. А., & Аветісян, В. Г. (2016). Довідник керівника гасіння пожежі.

108. Сенчихін, Ю. М., Сировий, В. В., Ліснюк, А. А., & Дерев'янку, І. Г. (2015). Основи тактики гасіння пожеж.

109. Степаненко С.Г., Білкун Д.Г., Яник Я.М., Тимощук Ю.Т. Дослідження пожеж: довідково-методичний посібник. К. : «Пожінформтехніка», 1999. 224 с.

110. Борисова А. Ніжник В., Серета Д. (2020) Експериментальні дослідження поверхневої густини теплового потоку в умовах вітрового впливу. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека* № 1 (9), с. 107–115.

111. Ніжник В.В., Борисова А.С. (2020) Методика експериментальних досліджень залежності критичної поверхневої густини теплового потоку від

вітрового впливу. *Комунальне господарство міст. Серія: «Економічні науки», 3(156), с. 200-203.*

112. Ніжник В.В. Розвиток наукових основ оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти : автореф. Дис. д-р. техн. наук : 21.06.02. Київ, 2020. 48 с.

113. Серета Д.В., Балло Я. В. До питань удосконалення розрахункового методу визначення протипожежних відстаней для вітрових електроустановок. Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: Зб. наук. праць XIX Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів Львів: ЛДУ БЖД, 2024. С. 151-154

114. Електричні мережі та системи. Режими роботи розімкнених мереж : Навчальний посібник з дисципліни для всіх форм навчання та студентів іноземців напряму підготовки 6.050701 “Електротехніка та електротехнології”/Уклад. В.В.Кирик.-К.: НТУУ «КПІ», 2014.-130 с.

115. How Much CO2 Gets Emitted to Build a Wind Turbine? URL: <https://stopthesethings.com/2014/08/16/how-much-co2-gets-emitted-to-build-a-wind-turbine/>.

116. Mikindani, D., O'Brien, J., Leahy, P., & Deeney, P. (2025). The financial risks from wind turbine failures: a value at risk approach. *Applied Economics*, 57(39), 6105-6120.

117. Оголошення про проведення спрощеної закупівлі UA-2024-05-28-005150-а // Прозорро. URL: <https://prozorro.gov.ua/uk/tender/UA-2024-05-28-005150-a>.

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. **Середа Д.В.,** Балло Я.В. (2024). Удосконалення розрахункового методу визначення протипожежних відстаней для вітрових електроустановок. *Пожежна безпека*, 45, 71-80. <https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.09>

Особистий внесок – проаналізовано існуючі методи оцінки безпечних протипожежних відстаней та сформульовано задачі досліджень.

2. **Середа Д.В.,** Балло Я.В. (2025). Методика дослідження поширення пожежі від вітрової електроустановки до суміжних об'єктів. *Комунальне господарство міст*. Серія: «Інформаційні технології та інженерія», 1(189), 377-383. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-377-383>

Особистий внесок – розроблено методику досліджень поширення пожежі в разі аварій на вітровій електроустановці, обґрунтовано критерії оцінювання, методологію проведення досліджень, а також засоби вимірювальної техніки.

3. **Середа Д.В.,** Балло Я.В. (2025). Результати натурних вогневих досліджень розвитку пожежі під час аварійного падіння вітрової електроустановки. *Комунальне господарство міст*. Серія: «Інформаційні технології та інженерія», 4(192), 343-349. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-377-383>

Особистий внесок – наведено систематизовані результати натурних вогневих досліджень під час імітації аварійної ситуації падіння вітрової електроустановки та її подальшого займання.

4. Борисова А.С., Ніжник В.В., **Середа Д.В.** (2020) Експериментальні дослідження поверхневої густини теплового потоку в умовах вітрового впливу. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. К.: № 1 (9), С. 107-115. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2020.1.107-115>

Особистий внесок – узагальнено результати натурних вогневих досліджень та сформульовано висновки на основі отриманих залежностей.

5. Климась Р.В., Ніжник В.В., Нікулін О.Ф., Крикун О.М., **Середа Д.В.**, Цимбалістий С.З. (2021) Експериментальні дослідження встановлення закономірності зниження температури та припинення горіння трансформаторного масла залежно від параметрів гравійної засипки маслоприймача. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. К.: № 2 (12), С. 101-111. [https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2\(12\).101-110](https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2(12).101-110)

Особистий внесок – обґрунтовано методологічні аспекти проведення натурних вогневих досліджень та систематизовано отримані експериментальні дані.

6. Климась Р.В., Ніжник В.В., Несенюк Л.П., **Середа Д.В.** (2023) До питань економічного ефекту під час впровадження методу прогнозування припинення та поширення горіння системою вогнеперешкоджання на масло наповнених трансформаторних підстанціях. *Науковий журнал: Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. Серія: Технічні науки. К.: Том 34 (73), № 3, С. 52-57. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/09>

Особистий внесок – обґрунтовано ключові чинники, які впливають на показники економічної доцільності впровадження удосконаленої системи вогнеперешкоджання.

7. Балло Я.В., Коваль Р.Р., **Середа Д.В.**, Несенюк Л.П. (2026) Дослідження процесів поширення пожежі від вітрової електроустановки за допомогою обчислювальної газо-гідродинаміки. *Комунальне господарство міст*. Серія: «Інформаційні технології та інженерія», 1(196), 277-289. <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2026-1-196-277-289>

Особистий внесок – обґрунтовано критеріальні умови, сценарій розвитку пожежі, а також розроблено газо-гідродинамічну модель вітрових електроустановок та середовища досліджень.

Публікації, які засвідчують апробацію дисертації

8. **Середа Д.В.**, Балло Я.В. Аналіз пожежної небезпеки вітроелектростанцій. Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: Зб. наук. праць XVII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів. Львів: ЛДУБЖД, 2022. С. 31-34

Особистий внесок – досліджено основні причини виникнення пожеж на вітрових електроустановках.

9. Y.V. Ballo, A.V. Mykhailova, **D.V. Sereda**, I.G. Stylyk, O.O. Sizikov Assessment of the possible impact of wind generator fire on the environment. XVI International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment». Kyiv, 2022. Page. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580021>

Особистий внесок – здійснено оцінку потенційних небезпек під час аварій, що супроводжуються пожежами на вітрових електроустановках.

10. **Середа Д.В.**, Балло Я.В. Аналіз моделі аварійного розтікання мастила від вітроелектроустановки. Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: Зб. наук. праць XVIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів. Львів: ЛДУ БЖД, 2023. С. 78-81

Особистий внесок – представлено основні чинники, які впливають на формування моделі аварійного розтікання мастила.

11. **Середа Д.В.**, Балло Я.В. До питання процесів теплообміну між факелом пожежі електроустановки та суміжними об'єктами. Problems of Emergency Situations: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2023. С. 145-146

Особистий внесок – наведено результати досліджень, щодо особливостей протікання процесів теплопередачі під час аварій нестационарного характеру.

12. **Середа Д.В.**, Балло Я. В. До питань удосконалення розрахункового методу визначення протипожежних відстаней для вітрових електроустановок. Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: Зб. наук.

праць XIX Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів Львів: ЛДУ БЖД, 2024. С. 151-154

Особистий внесок – представлено удосконалену математичну модель, яка дозволяє більш точно оцінити безпечні протипожежні відстані.

13. Балло Я.В., **Серета Д.В.** Експериментальні дослідження поширення пожежі від вітрових електроустановок до суміжних об'єктів. Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції, Львів: ЛДУБЖД, 2024. С. 61-63

Особистий внесок – узагальнено результати експериментальних досліджень щодо оцінки безпечних протипожежних відстаней.

ДОДАТОК Б

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи



МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ ГРОМАД ТА ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНИ

пр-т Берестейський, 14, м. Київ, 01135,
 тел.: (044) 351-40-96, (044) 351-40-35, (044) 351-40-01,
 E-mail: miu@mtu.gov.ua, сайт: www.mtu.gov.ua, код згідно з ЄДРПОУ 37472062

від _____ 20__ р. № _____

На № _____ від _____ 20__ р.

Національний університет
 цивільного захисту України

Довідка про впровадження

Результати дисертаційної роботи Середи Дмитра Володимировича за темою «Удосконалення методу оцінювання небезпеки поширення пожежі від вітрових електроустановок» становлять практичну цінність та плануються Міністерством до впровадження під час розроблення подальших необхідних змін до ДБН Б.2.2-12:2019 «Планування і забудова територій» в частині удосконалення вимог щодо протипожежних відстаней під час влаштування вітрових електроустановок відносно суміжних об'єктів.

Заступник Міністра

Наталія КОЗЛОВСЬКА



ДОКУМЕНТ СЕД

Підписувач Козловська Наталія Вікторівна
 Сертифікат 6FA97849F1B2570D0400000095C701005E030600
 Дійсний з 03.02.2025 12:33:58 по 03.02.2026 12:33:58

Міністерство розвитку громад
 та територій України



37118/26/14-25 від 16.12.2025

АКТ
впровадження результатів дисертаційної роботи
СЕРЕДИ Дмитра Володимировича
за темою «Удосконалення методу оцінювання небезпеки поширення пожежі від
вітрових електроустановок»

Даний акт складено про те, що в Українському союзі пожежної та техногенної безпеки впроваджено в практичну діяльність союзу результати дисертаційної роботи Середи Д.В. за темою «Удосконалення методу оцінювання небезпеки поширення пожежі від вітрових електроустановок» в частині удосконаленні розрахункового методу визначення протипожежних відстаней з використанням рівняння променистого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності, зокрема для розрахунку протипожежних відстаней від вітрової електроустановки до суміжних об'єктів інфраструктури. Застосування отриманих результатів дозволить підвищити точність розрахункового методу оцінювання небезпеки поширення пожежі від вітрових електростанцій на суміжні об'єкти як наукове підґрунтя для встановлення для них безпечних протипожежних відстаней.

Президент - Голова правління



Борис ПЛАТКЕВИЧ

03.12.2025



ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний проректор

Національного університету цивільного

захисту України

з надзвичайної роботи

Олександр ДЖУЛАЙ

18" грудня 2025 року

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи за темою «Удосконалення методу оцінювання небезпеки поширення пожежі від вітрових електроустановок» автора
СЕРЕДИ Дмитра Володимировича

Комісія у складі:

голови – начальника навчально-наукового інституту пожежної та техногенно безпеки, кандидата технічних наук, доцента Мельника В.П.

та членів – доцента кафедри державного нагляду у сфері пожежної та техногенно безпеки Національного університету цивільного захисту України, кандидата технічних наук, доцента Миргород О.В.;

старшого викладача кафедри державного нагляду у сфері пожежної та техногенно безпеки Національного університету цивільного захисту України Майборода Р.І. склали акт, який підтверджує, що результати дисертаційної роботи за темою «Удосконалення методу оцінювання небезпеки поширення пожежі від вітрових електроустановок» мають теоретичне та практичне значення для освітнього процесу. Отримані дані та виявлені залежності в сукупності забезпечують удосконалення методу прогнозування небезпеки поширення пожежі на суміжні об'єкти від вітрових електроустановок з урахуванням їх конструктивних параметрів та аварійних сценаріїв, при цьому отримав розвиток експериментальний метод визначення параметрів утворення зони пожежі та теплообміну з використанням імітаційного зразка об'єкта. Методику оцінювання небезпеки поширення пожежі від вітрової електроустановки впроваджено в освітній процес на кафедрі державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки Національного університету цивільного захисту України в навчальній дисципліні «Системи забезпечення пожежної безпеки об'єктів» при підготовці здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 261 «Пожежна безпека». Впровадження результатів досліджень даної дисертаційної роботи дозволить підвищити якість провадження лекційних та практичних занять шляхом розширення знань здобувачів за рахунок практичного застосування нових наукових даних.

Голова комісії:

начальник навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки, кандидата технічних наук, доцента

Валентин МЕЛЬНИК

Члени комісії:

доцент кафедри державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки НУЦЗ України, кандидат технічних наук, доцент

Оксана МИРГОРОД

старший викладач кафедри державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки НУЦЗ України

Роман МАЙБОРОДА