

Я.В. Балло, Р.Р. Коваль, Д.В. Серета, Л.П. Несенюк

*Інститут наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ВІД ВІТРОВОЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВКИ ЗА ДОПОМОГОЮ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ГАЗО-ГІДРОДИНАМІКИ

*У статті наведено результати чисельного CFD-моделювання процесів поширення пожежі від вітрових електроустановок за аварійним сценарієм «руйнування–пожежа». Досліджено вплив потужності ВЕС, кількості оливи та вітрового навантаження на формування зон теплового впливу. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування безпечних протипожежних відстаней між ВЕС і суміжними об'єктами.*

**Ключові слова:** вітрова електроустановка, пожежна безпека; CFD-моделювання, сценарій «руйнування-пожежа», тепловий вплив, протипожежні відстані, оцінка ризиків, вітрове навантаження.

### Постановка проблеми

Інтенсивний розвиток вітроенергетики супроводжується зростанням одиничної потужності та геометричних розмірів вітрових електроустановок, що зумовлює підвищення їх пожежної небезпеки. Особливо небезпечними є аварійні сценарії типу «руйнування–пожежа», за яких відбувається механічне руйнування гондоли та ротора з подальшим розливом і займанням значної кількості оливи, а також горіння полімерних і композитних матеріалів лопатей.

За наявності вітрового навантаження такі пожежі характеризуються швидким поширенням теплового впливу та можуть створювати загрозу суміжним об'єктам інфраструктури різного функціонального призначення.

Чинні нормативні підходи до визначення протипожежних відстаней від ВЕС, як правило, ґрунтуються на спрощених розрахункових моделях або геометричних параметрах розливу пального і не враховують комплексний вплив потужності установки, кількості оливи, висоти опори та метеорологічних умов, зокрема швидкості й напрямку вітру. Це призводить до значної невизначеності в оцінюванні реальних зон теплового впливу пожежі та потенційного заниження рівня пожежного ризику.

Додатковим ускладнюючим чинником є відсутність систематизованих експериментальних та розрахункових даних щодо реальних зон теплового впливу пожеж від ВЕС різної потужності. Наявні

дослідження, як правило, обмежуються аналізом окремих аварійних випадків або розглядом пожеж у межах конструкції гондоли, без оцінювання поширення пожежі по поверхні ґрунту та у відкритому просторі з урахуванням вітрових умов.

Особливої актуальності проблема набуває в контексті розміщення вітрових електростанцій поблизу об'єктів критичної інфраструктури, сільськогосподарських угідь, транспортних комунікацій та лісових масивів. У таких умовах неконтрольоване поширення теплового впливу пожежі може призводити до вторинних загорянь, каскадного розвитку надзвичайних ситуацій та значних матеріальних збитків, що не враховується в традиційних підходах до оцінювання пожежної небезпеки ВЕС.

Виявлена за результатами моделювання істотна різниця між розрахунковим радіусом розливу оливи та фактичним радіусом небезпечного теплового впливу пожежі свідчить про методичну невідповідність існуючих інженерних оцінок реальним умовам розвитку аварій. За наявності вітрового навантаження ця різниця може досягати десятків відсотків, що суттєво впливає на правильність визначення безпечних протипожежних відстаней.

У зв'язку з цим виникає потреба у формуванні науково обґрунтованої бази для врахування енергетичного потенціалу пожежної навантаги ВЕС, зокрема кількості та фізико-хімічних властивостей оливи, геометричних параметрів установки та метеорологічних умов. Розв'язання цієї проблеми

можливе лише шляхом застосування обчислювальної газо-гідродинаміки як інструменту інтегрального аналізу процесів горіння, теплопереносу та поширення небезпечних чинників пожежі у відкритому просторі.

У зв'язку з цим актуальною науково-прикладною проблемою є розробка та застосування обґрунтованих газо-гідродинамічних моделей для кількісного оцінювання процесів поширення пожежі від вітрових електроустановок за найбільш несприятливих аварійних сценаріїв. Вирішення цієї проблеми дозволить уточнити небезпечні зони теплового впливу, підвищити достовірність визначення безпечних протипожежних відстаней і забезпечити належний рівень пожежної безпеки об'єктів вітроенергетики та прилеглих територій.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Дослідження, присвячені запобіганню поширенню пожежі та зменшенню теплового впливу між пожежонебезпечними об'єктами, представлені у працях вітчизняних і зарубіжних авторів, зокрема Шналя Т., Поздеева С.В., Нуянзіна О., Ніжника В.В., Сіднея С., Яковчука Р.С., Новака С.В., Зенгіна, Косе, Гібсона, Раша та інших [5, 12, 13]. У цих роботах розглядаються загальні закономірності теплообміну під час пожеж, а також підходи до визначення протипожежних відстаней між будівлями та спорудами.

Водночас більшість наведених досліджень базуються на класичних розрахункових моделях і орієнтовані переважно на об'єкти цивільного будівництва. Питання поширення пожежі від вітрових електроустановок як специфічних технічних об'єктів у них практично не розглядалося. Зокрема, не враховувалися конструктивні особливості ВЕС, значна висота розміщення пожежної навантаги, наявність оливковмісних систем, а також використання полімерних і композитних матеріалів.

Крім того, у проаналізованих роботах недостатньо уваги приділялося впливу вітрового навантаження на формування зон теплового впливу пожежі, що є принципово важливим для об'єктів вітроенергетики, які експлуатуються в умовах постійної дії вітру.

Таким чином, наявні наукові публікації не дають повного уявлення про процеси поширення пожежі від вітрових електроустановок і не дозволяють обґрунтовано визначати безпечні протипожежні відстані з урахуванням реальних умов їх експлуатації. Це зумовлює необхідність проведення додаткових

досліджень із застосуванням чисельних методів, зокрема CFD-моделювання.

### **Формування мети статті**

Метою статті є комплексне дослідження процесів виникнення та поширення пожежі від вітрових електроустановок різної встановленої потужності за найбільш несприятливого аварійного сценарію «руйнування-пожежа» із використанням методів обчислювальної газо-гідродинаміки. У роботі передбачається кількісне оцінювання просторово-часової динаміки розвитку пожежі на поверхні ґрунту та в навколишньому повітряному середовищі з урахуванням геометричних параметрів ВЕС, об'єму та енергетичного потенціалу оливковмісних систем, фізичних властивостей конструкційних матеріалів, а також впливу метеорологічних чинників, зокрема швидкості та напрямку вітру.

Досягнення поставленої мети спрямоване на визначення зон критичного теплового впливу пожежі, встановлення закономірностей їх формування залежно від типу та потужності вітрових електроустановок, а також на виявлення відмінностей між прогнозованими зонами розливу пального і фактичними зонами небезпечного теплового впливу. Отримані результати мають на меті підвищення достовірності оцінювання пожежної безпеки ВЕС та формування науково обґрунтованих рекомендацій щодо уточнення безпечних протипожежних відстаней і вдосконалення підходів до забезпечення пожежної безпеки об'єктів вітроенергетики та прилеглих територій.

### **Виклад основного матеріалу**

Для дослідження та проведення оцінювання сценаріїв розвитку пожежі та розповсюдження її небезпечних чинників відносно суміжних об'єктів ефективним інструментом є CFD-моделювання, що проводилося на основі методів та підходів, визначених у [1]. Розробка та застосування CFD-моделей дозволяє дослідити потенційну динаміку поширення вогню від ВЕУ, визначити зони потенційної пожежної безпеки 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 [2] 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 [3, 4]. 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 закладається принцип відтворення сценарію, коли опора гондoli вітрової електроустановки в результаті технологічної несправності втрачає несучу здатність та руйнується чим зменшує відстань між об'єктами [5]. Корпус гондoli 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 згорання пожежної навантаги приймали в межах 750 МДж/м<sup>2</sup>, як максимальне значення пожежної навантаги для оливи вмісних технологічних установок. Кількість теплоти, що виділяється під час повного згорання горючих матеріалів на одиницю площі поверхні вогневого майданчику прийнято, як для сухої трави або лугової рослинності 17 МДж/м<sup>2</sup> [6]. Лінійна швидкість поширення пожежі згідно з даними [7] 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 м<sup>2</sup>, що обумовлюється геометричними розмірами моделі вітрової електростанції та кратності 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 розрахованій площі, 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 1.



Рис. 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<sup>3</sup>, питома теплоємність 0,48 кДж/(кг·К) та теплопровідністю 15,0 Вт/(м·К), коефіцієнт випромінювання 0,85. В основі основної несучої опори закладено бетон, густиною 1950 кг/м<sup>3</sup>, питома теплоємність 0,81 кДж/(кг·К) та теплопровідністю 0,64 Вт/(м·К). В якості конструкції вітрових лопатей та окремих елементів корпусу гондoli використано полімерні матеріали густиною 890 кг/м<sup>3</sup>, питома теплоємність 0,69 кДж/(кг·К) та теплопровідністю

0,21 Вт/(м·К) та грунт густиною 5510 кг/м<sup>3</sup>, з питомою теплоємністю 0,87 кДж/(кг·К) та теплопровідністю 4,0 Вт/(м·К). На рисунку 2 наведено основні компоненти моделі, параметри яких закладено в моделі вітрової електроустановки.

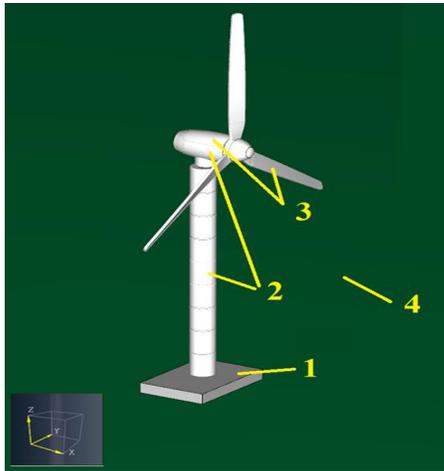


Рис. 2. Основні складові компоненти параметрів вітрової електроустановки, де: 1 – бетонна основа; 2 – вежа та гондола; 3 – лопаті; 4 – навколишній простір.

В якості критерію, яких характеризує небезпеку поширення пожежі прийнято значення температури у 250 °С, що відповідає температурі деформування основного матеріалу з найменшим температурним опором, а саме полімерних матеріалів згідно з [8]. Даний тип матеріалів широко застосовується в об'єктах будівництва різного функціонального призначення, технологічних установках та транспортній індустрії.

Під час відтворення моделі вітрової установки не відтворювалися компоненти системи протипожежного захисту ВЕС 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 [9].

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 [10, 11] місцевості роботи типових вітрових електростанцій.

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 ВЕС.

За результатом аналізу пожежонебезпечних ситуацій, які виникали на ВЕС визначено, що найбільш несприятливим сценарієм розвитку пожежі є сценарій «руйнування-пожежа». У конструкції гондoli та лопатей ВЕС використовуються композити 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 ВЕС 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 ВЕС втрачається працездатність систем моніторингу і віддаленого відключення, що призводить до неконтрольованого розвитку пожежі [12].

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

гондולי не враховується, з точки зору відтворення найгіршого варіанту сценарію утворення і розвитку пожежі.

На рисунку 3 наведено візуалізацію моделі досліджуваного майданчику та досліджуваних типів ВЕС після їх падіння.

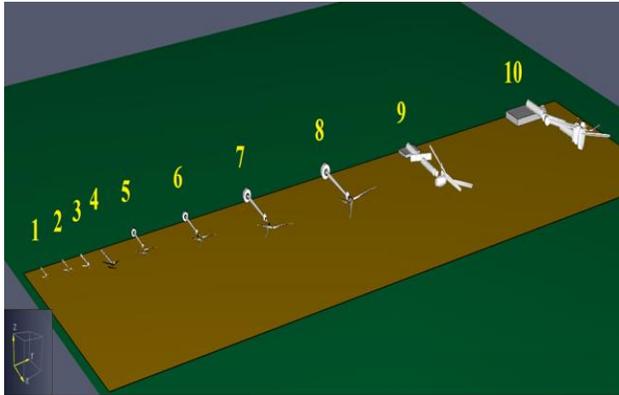


Рис. 3. Візуалізація початкового ситуаційного розміщення досліджуваних моделей за сценарієм «руйнування-пожежа»

Для оптимізації розрахункового процесу щодо дослідження процесів поширення пожежі для ВЕС, базову модель, яка складається з 10 основних типів вітрових установок розділено на 3 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 R<sup>2</sup> 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 ВЕС встановлюються датчики контролю температури в просторі для дослідження значень протипожежних відстаней. Зазначені вимірники 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 ВЕС, зокрема їх висоти та кількості оливи в об'ємі

механічної частини ротора. На основі отриманих даних планується побудувати графік відповідних залежностей.

В таблиці 1 наведено розбиті фрагменти моделі для чотирьох етапів моделювання для кожної визначеної групи ВЕС.

Таблиця 1

Візуалізація досліджуваних груп ВЕС

1 група ВЕС від 0,03 МВт до 0,2 МВт	2 група ВЕС від 0,5 МВт до 2 МВт
3 група ВЕС від 3 МВт до 7,2 МВт	4 група ВЕС 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 ВЕС.

Визначені вихідні дані та розрахунковий сценарій для визначених типів та груп ВЕС 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 ВЕС і суміжних об'єктів, а також та умов навколишнього середовища.

За результатом проведеного моделювання у продовж визначеного часу, а саме 600 секунд пожежа від зруйнованого корпусу ВЕС вільно поширювалася на визначеній ділянці вогневого майданчику. За результатом проведених розрахункових дій визначено карту теплового впливу для кожного етапу моделювання. На рисунках 4,5 наведено візуалізацію пожежі та картограму температурних розподілів отриманих під моделювання пожежі для першої групи ВЕС від 0,03 МВт до 0,2 МВт.

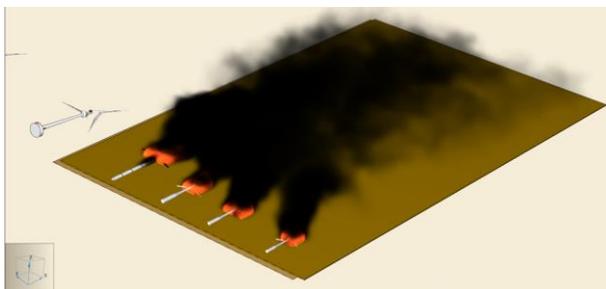


Рис. 4. Візуалізація процесу розвитку пожежі для першої групи ВЕС

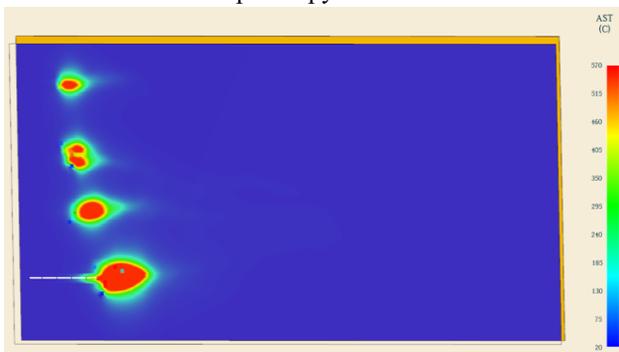


Рис. 5. Візуалізація температурних розподілів в результаті розвитку пожежі на поверхні ґрунту для першої групи ВЕС

Також за результатом першого етапу моделювання визначено температурні розподіли від змодельованих осередків пожежі в просторі, візуалізацію яких наведено на рисунку 6.

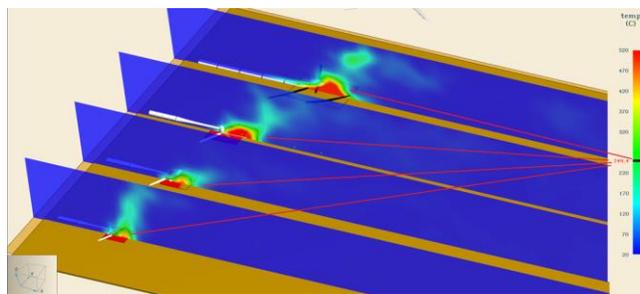


Рис. 6. Візуалізація динаміки поширення температурних розподілів у розрахунковому просторі та зона граничного значення у 250 °С

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

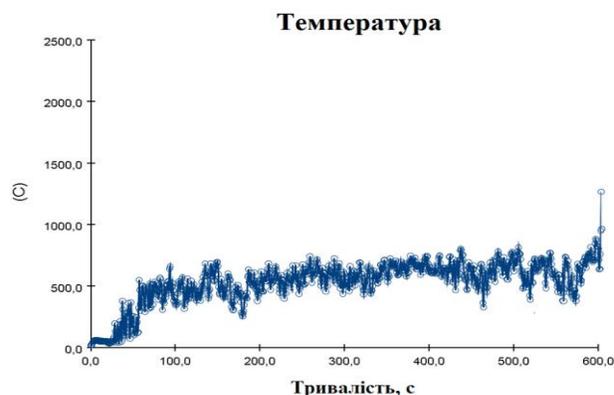


Рис. 7. Усереднений графік температурного режиму в зоні осередку горіння для першої групи ВЕС

Отримані дані свідчать, що для першої групи ВЕС, 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 становить в межах 580-650 °С 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 8, 9 наведено візуалізацію пожежі та картограму температурних розподілів отриманих під моделювання пожежі для другої групи ВЕС від 0,5 МВт до 2 МВт.

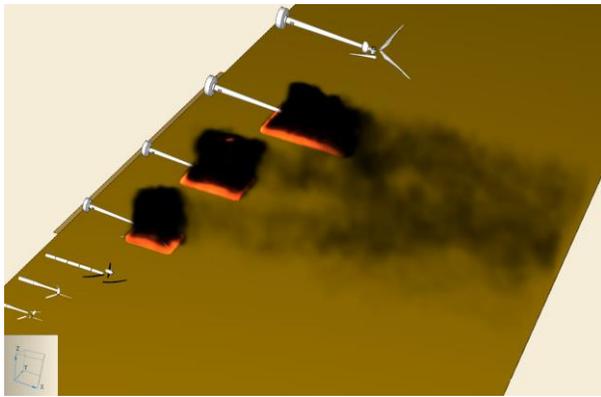


Рис. 8. Візуалізація процесу розвитку пожежі для другої групи ВЕС

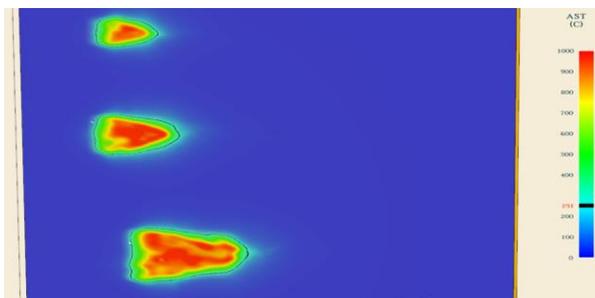


Рис. 9. Візуалізація температурних розподілів в результаті розвитку пожежі на поверхні ґрунту для другої групи ВЕС

За результатом проведеного другого етапу комп'ютерного моделювання розвитку пожежі визначено температурні розподіли від змодельованих осередків пожежі в просторі, візуалізацію яких наведено на рисунку 10.

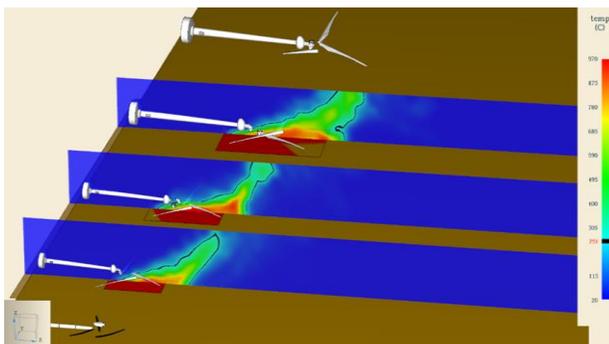


Рис. 10. Візуалізація динаміки поширення температурних розподілів у розрахунковому просторі та зона граничного значення у 250 °С.

За результатом аналізу даних, отриманих від вимірювачів в газовому середовищі, побудовано усереднений графік температурного режиму в зоні

осередку горіння для другої групи ВЕС

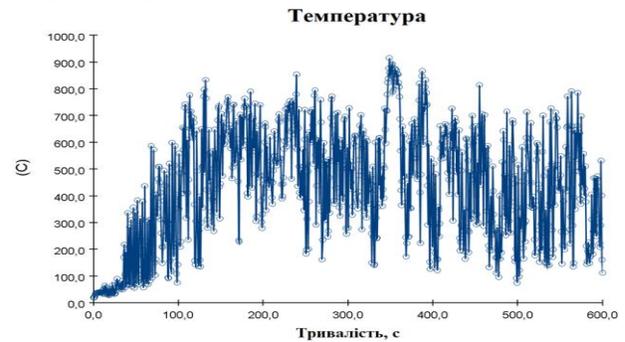


Рис. 11. Усереднений графік температурного режиму в зоні осередку горіння для другої групи ВЕС

Отримані дані свідчать, що для другої групи ВЕС, 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 становим в 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 12, 13 наведено візуалізацію пожежі та картограму температурних розподілів отриманих під моделювання пожежі для третьої групи ВЕС від 3,0 МВт до 7,2 МВт.

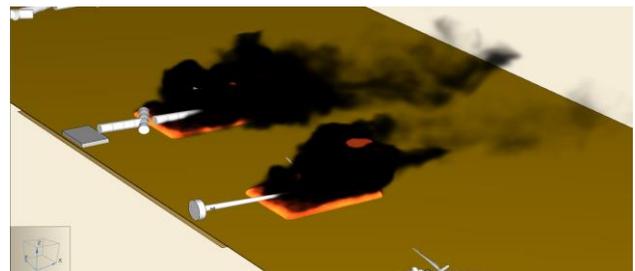


Рис. 12. Візуалізація процесу розвитку пожежі для третьої групи ВЕС

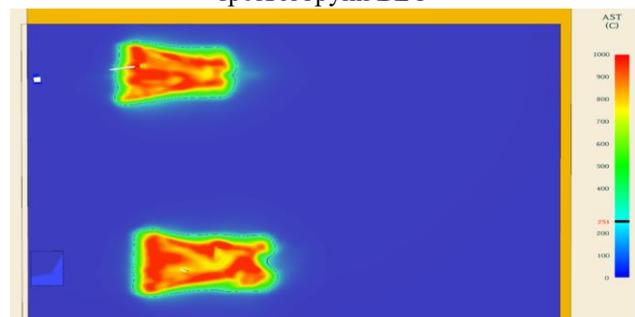


Рис. 13. Візуалізація температурних розподілів на поверхні ґрунту в результаті розвитку пожежі для третьої групи ВЕС

За результатом третього етапу моделювання визначено температурні розподіли від змодельованих осередків пожежі в просторі, візуалізацію яких наведено на рисунку 14.

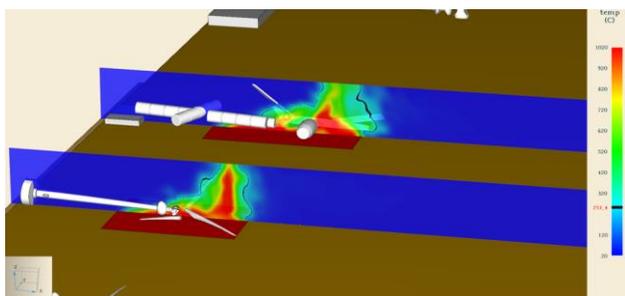


Рис. 14. Візуалізація динаміки поширення температурних розподілів у розрахунковому просторі та зона граничного значення у 250 °С.

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

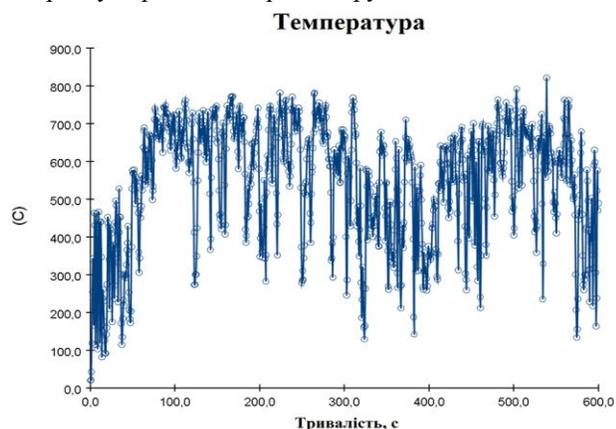


Рис. 15. Усереднений графік температурного режиму в зоні осередку горіння для третьої групи ВЕС

Отримані дані свідчать, що для третьої групи ВЕС, 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 становим в межах 680-740 °С та мав прогнозований характер її розвитку.

Останній, четвертий етап моделювання розрахункового сценарію пожежі для четвертого типу ВЕС 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 ВЕС передбачається

моделювання руйнування несучої опори гондоли, що спостерігалось на ряді аварій для аналогічних типів ВЕС. На рисунках 16, 17 наведено візуалізацію пожежі та картограму температурних розподілів отриманих під моделювання пожежі для даної групи ВЕС.



Рис. 16. Візуалізація процесу розвитку пожежі для четвертого типу ВЕС

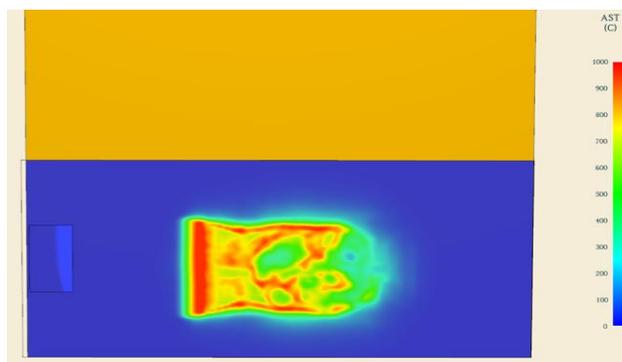


Рис. 17. Візуалізація температурних розподілів на поверхні ґрунту в результаті розвитку пожежі для четвертого типу ВЕС

За результатом третього етапу моделювання визначено температурні розподіли від змодельованих осередків пожежі в просторі, візуалізацію яких наведено на рисунку 18.

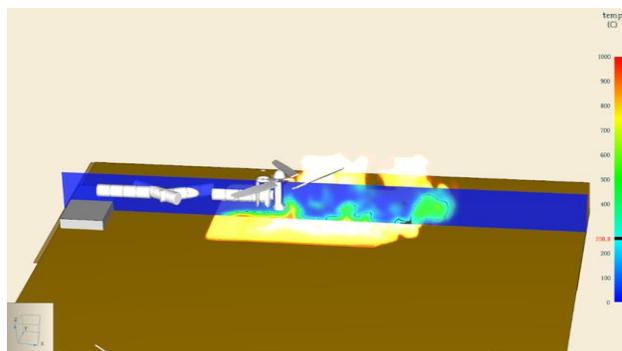


Рис. 18. Візуалізація динаміки поширення температурних розподілів у розрахунковому просторі та зона граничного значення у 250 °С.

За результатом аналізу даних, отриманих від

вимірювачів в газовому середовищі, побудованого усереднений графік температурного режиму в зоні осередку горіння для четвертого типу ВЕС.

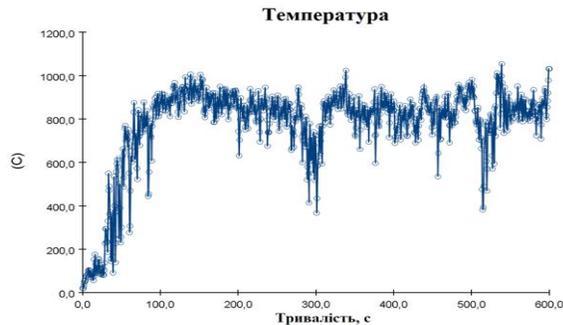


Рис. 19. Усереднений графік температурного режиму

в зоні осередку горіння для четвертої групи ВЕС

За результатом проведених етапів моделювання за сценарієм «руйнування-пожежі», 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 ВЕС, що приведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Зведені дані щодо розрахункового радіусу розливу та орієнтовних зон теплового впливу для визначених типів ВЕС

Н/п	Потужність, кВт	Висота башти R1, м	Кількість оливи у об'ємі механічної частини ротора, л	Розрахунковий радіус розливу, R2, м (±0,3 м)	Орієнтовний радіус теплового впливу вище 250 °С, м (±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	індивідуально	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 палива.

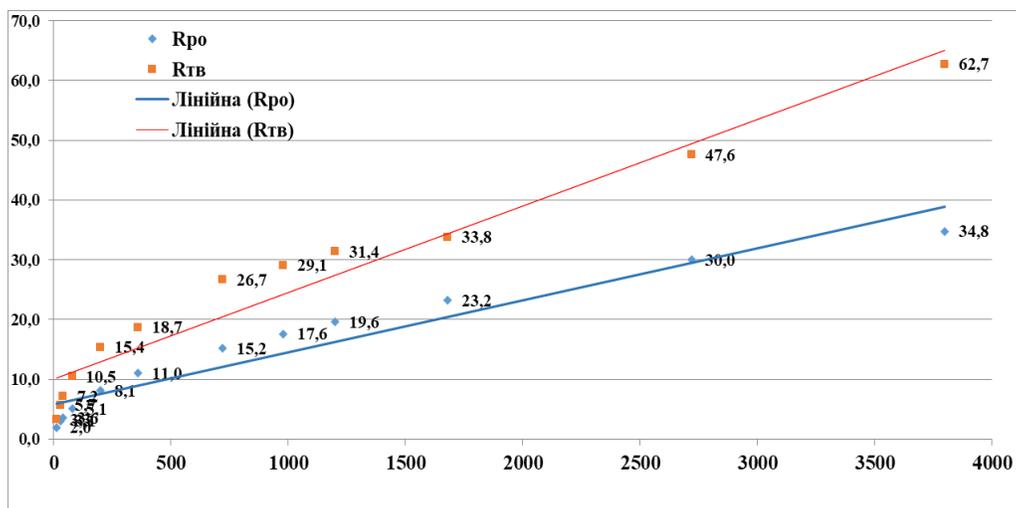


Рис. 20. Експериментальні дані утворення небезпечного радіусу температурного впливу пожежі та розрахункового радіусу зони розливу палива

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 згорання 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 [13].

Для коректної інтерпретації графічних результатів CFD-моделювання (рис. 4-19) слід враховувати, що візуалізація температурних полів виконана на єдиній розрахунковій сітці з лінійним кроком комірки 0,5 м (площа однієї комірки становить 0,25 м<sup>2</sup>). Масштаб відображених зон варіюється відповідно до прогнозованих площ поширення пожежі для кожної групи установок: для першої групи ВЕС (0,03–0,2 МВт) візуалізована область охоплює зону з радіусом теплового впливу до 10,5 м; для другої групи (0,5–2,0 МВт) масштабний відрізок відображає зону радіусом до 27 м; для третьої групи (3,0–7,2 МВт) – до 48 м; а для четвертої групи (9,5 МВт) представлена область охоплює ділянку діаметром понад 120 м, що відповідає максимальному розрахунковому радіусу небезпечного теплового впливу 62,7 м.

Аналіз чинного законодавства показав суттєву

прогалину у вітчизняному нормативному полі. Чинні будівельні норми регламентують протипожежні відстані переважно для будівель із визначеним ступенем вогнестійкості, що не враховує специфіку вітрових електроустановок як висотних зовнішніх установок. Зокрема, документ [14] встановлює вимогу щодо розміщення ВЕС на відстані не менше 1 км від населених пунктів, проте ця норма базується виключно на розрахунку рівня шуму, а не на оцінці пожежних ризиків. Також рекомендація розміщувати ВЕУ на відстані 2–3 діаметрів ротора продиктована ефективністю виробництва енергії, а не безпекою поширення вогню. На відміну від цих підходів, наше дослідження доводить необхідність визначення відстаней саме на основі розрахунку теплових потоків та сценаріїв аварійного руйнування, які наразі нормативно не визначені для суміжних наземних об'єктів та підземних комунікацій.

Порівняльний аналіз отриманих результатів моделювання з вимогами чинних нормативних документів, зокрема [14], виявив суттєві розбіжності в оцінюванні безпечних відстаней. Традиційні інженерні методики, що базуються на геометричних параметрах розливу рідини, не враховують вітрове перенесення теплового потоку. Як показують дані Таблиці 2, для ВЕС потужністю 9,5 МВт розрахунковий радіус розливу становить близько 35 м, тоді як фактична зона небезпечного теплового впливу ( $T > 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) за умови вітру 10 м/с сягає 62,7 м. Це свідчить про те, що застосування лише геометричних підходів може призвести до заниження безпечних відстаней на 40–45 %, створюючи ризики для суміжних об'єктів.

## Висновки

1. У роботі обґрунтовано доцільність застосування методів обчислювальної газо-гідродинаміки для дослідження процесів поширення пожежі від вітрових електроустановок за аварійним сценарієм «руйнування–пожежа». CFD-моделювання дозволило комплексно врахувати вплив геометричних параметрів ВЕС, кількості оливи, фізичних властивостей конструкційних матеріалів і метеорологічних чинників, зокрема швидкості вітру, на формування небезпечних зон теплового впливу.

2. Встановлено, що сценарій «руйнування–пожежа» є найбільш несприятливим з точки зору пожежної безпеки ВЕС, оскільки супроводжується розливом значних об'ємів оливи, інтенсивним горінням композитних і полімерних матеріалів та втратою працездатності систем моніторингу і пожежогасіння. За таких умов пожежа розвивається неконтрольовано та характеризується високим енергетичним потенціалом.

3. За результатами чисельного моделювання визначено просторово-часові температурні поля та встановлено характерні діапазони температур у зоні осередку горіння для різних груп ВЕС. Показано, що зі зростанням встановленої потужності, висоти опори та кількості оливи середній температурний режим пожежі підвищується від 580–650 °C для ВЕС малої потужності до 700 °C і вище для установок потужністю понад 7 МВт.

4. Виявлено чітку залежність радіуса небезпечного теплового впливу (за критерієм температури 250 °C) від кількості оливи в механічній частині ротора та параметрів вітрового навантаження. Для ВЕС великої потужності орієнтовний радіус зони критичного теплового впливу досягає 60 м і більше, що істотно перевищує радіус, визначений за спрощеними інженерними методиками розрахунку зони розливу палива.

5. Порівняльний аналіз показав, що різниця між розрахунковим радіусом розливу оливи та фактичним радіусом небезпечного теплового впливу пожежі з урахуванням вітрового навантаження може сягати до 45 %. Це свідчить про методичну обмеженість традиційних підходів до нормування протипожежних відстаней від ВЕС і потенційне заниження рівня пожежного ризику для суміжних об'єктів.

6. Отримані результати підтверджують, що при визначенні безпечних протипожежних відстаней від вітрових електроустановок доцільно враховувати не лише геометричні параметри зони розливу, але й енергетичний потенціал пожежної навантаги, зокрема

кількість і питому теплоту згоряння оливи, а також реальні метеорологічні та топографічні умови.

7. Практичне значення проведеного дослідження полягає у можливості використання отриманих CFD-результатів як науково обґрунтованої основи для уточнення нормативних протипожежних відстаней, підвищення достовірності оцінювання пожежних ризиків ВЕС та розроблення ризик-орієнтованих заходів із забезпечення пожежної безпеки об'єктів вітроенергетики і прилеглих територій.

## Література

- 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
- Plotnikov, P., & Sokołowski, J. (2012). Compressible Navier-Stokes equations: theory and shape optimization (Vol. 73). Springer Science & Business Media.
- Iwaszczuk, N., Prytula, M., Prytula, N., Pyanylo, Y., & Iwaszczuk, A. (2022). Modeling of gas flows in underground gas storage facilities. *Energies*, 15(19), 7216.
- Баранюк, О. В., Воробйов, М. В., & Рачинський, А. Ю. (2023). CFD-моделювання процесів теплообміну і гідродинаміки засобами програмного комплексу.
- 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*
- Сенчихін, Ю. М., Сировий, В. В., Лісняк, А. А., & Аветісян, В. Г. (2016). Довідник керівника гасіння пожежі.
- Сенчихін, Ю. М., Сировий, В. В., Лісняк, А. А., & Дерев'яно, І. Г. (2015). Основи тактики гасіння пожеж.
- Степаненко С.Г., Білгун Д.Г., Яник Я.М., Тимошук Ю.Т. Дослідження пожеж: довідково-методичний посібник. К.: «Пожінформтехніка», 1999. 224 с.
- 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.
- 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.
- Ertek, G.; Kailas, L. Analyzing a Decade of Wind Turbine Accident News with Topic Modeling. *Sustainability* 2021, 13, 12757.
- Koval R.R., Yemelianenko S.O., Kuzyk A.D. Assessing the Risk of Material Damage of Building Construction of High-Rise Rooms Due to Fires and Emergencies. *Construction Technologies and Architecture*. 2023. № 9. P. 49–57.
- Nuianzin O., Palchykov R., Ballo Y., Nizhnyk V., Mykhailov V., Gavryliuk A., Loik V., Synelnikov O., Synelnikov S., Stepanenko V. Substantiating the parametric temperature mode during a fire on transformers placed inside

protective structures // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2024. – № 10 (132). – С. 37–45. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.317332

14. 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.

### References

1. 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, MD: National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory.

2. Plotnikov, P., & Sokołowski, J. (2012). Compressible Navier–Stokes equations: Theory and shape optimization (Vol. 73). Berlin, Heidelberg: Springer Science & Business Media.

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

4. Baraniuk, O. V., Vorobiov, M. V., & Rachynskiy, A. Yu. (2023). CFD-modeliuvannya protsesiv teploobminu i hidrodynamiky zasobamy prohramnoho kompleksu [CFD modeling of heat transfer and hydrodynamic processes using a software complex]. [in Ukrainian]

5. Sereda, D. V., & Ballo, Ya. V. (2023). Do pytannia protsesiv teploobminu mizh fakelom pozhezhi elektroustanovky ta sumizhnyimi ob'iektamy [On the issue of heat transfer processes between an electrical installation fire plume and adjacent objects]. *Problems of Emergency Situations: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Kharkiv: National University of Civil Protection of Ukraine, 145–146. [in Ukrainian]

6. Senchykhin, Yu. M., Syrovyi, V. V., Lisniak, A. A., & Avetisian, V. H. (2016). *Dovidnyk kerivnyka hasinnia pozhezhi* [Handbook of the fire suppression commander]. Kharkiv: [Publisher]. [in Ukrainian]

7. Senchykhin, Yu. M., Syrovyi, V. V., Lisniak, A. A., & Derevianko, I. H. (2015). *Osnovy taktyky hasinnia pozhezhi* [Fundamentals of fire suppression tactics]. Kharkiv: [Publisher]. [in Ukrainian]

8. Stepanenko, S. H., Bilkun, D. H., Yanyk, Ya. M., & Tymoshchuk, Yu. T. (1999). *Doslidzhennia pozhezhi: dovidkovo-metodychnyi posibnyk* [Fire investigation: reference and methodological guide]. Kyiv: Pozhinformtekhnik. [in Ukrainian]

9. On approval of criteria for the establishment of state fire and rescue units (divisions) of the civil protection operational and rescue service in administrative-territorial units and the list of business entities where such units are established: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated November 27, 2013, No. 874. *Ofitsiyni visnyk Ukrainy*, 96, 113. [in Ukrainian]

10. Pravyla proektuvannia vitrianykh elektrychnykh stantsii [Rules for the design of wind power plants]. GKD 341.003.001.002–2000. Effective from 01.08.2000. Kyiv: Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, Order dated 13.09.2000 No. 421, 50 p. [in Ukrainian]

11. Ertek, G., & Kailas, L. (2021). Analyzing a decade of wind turbine accident news with topic modeling. *Sustainability*, 13, 12757. <https://doi.org/10.3390/su132212757>

12. Koval, R.R., Yemelianenko, S.O., & Kuzyk, A. D. (2023). Assessing the risk of material damage of building construction of high-rise rooms due to fires and

emergencies. *Construction Technologies and Architecture*, (9), 49–57.

13. Nuianzin, O., Palchykov, R., Ballo, Y., Nizhnyk, V., Mykhailov, V., Gavryliuk, A., Loik, V., Synelnikov, O., Synelnikov, S., & Stepanenko, V. (2024). Substantiating the parametric temperature mode during a fire on transformers placed inside protective structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 10(132), 37–45.

14. Pravyla proektuvannia vitrianykh elektrychnykh stantsii [Rules for the design of wind power plants]. GKD 341.003.001.002–2000. Effective from 01.08.2000. Kyiv: Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, Order dated 13.09.2000 No. 421. 50 p. [in Ukrainian]

**Рецензент:** д-р техн. наук, професор В.В. Ніжник Інститут наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України, Україна

**Автор:** БАЛЛО Ярослав В'ячеславович  
доктор технічних наук, старший дослідник,  
заступник начальника центру - начальник науково  
дослідного відділу нормативного регулювання  
науково-дослідного центру нормативно-технічного  
регулювання Інституту наукових досліджень з  
цивільного захисту Національного університету  
цивільного захисту України  
e-mail: 2801397@ukr.net  
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9044-1293>

**Автор:** КОВАЛЬ Роман Романович  
доктор філософії за спеціальністю «Пожежна  
безпека», начальник науково-дослідного сектору  
дослідження та статистики пожеж науково-  
дослідного центру нормативно-технічного  
регулювання  
Інституту наукових досліджень з цивільного захисту  
Національного університету цивільного захисту  
України  
e-mail: koval\_roman@nuczu.edu.ua  
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8970-2831>

**Автор:** СЕРЕДА Дмитро Володимирович  
старший науковий співробітник науково-дослідного  
сектору дослідження та статистики пожеж  
науково-дослідного центру нормативно-технічного  
регулювання Інституту наукових досліджень з  
цивільного захисту Національного університету  
цивільного захисту України  
e-mail: seredadmitriy2019@gmail.com  
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9645-5864>

**Автор:** НЕСЕНІЮК Любов Петрівна  
науковий співробітник науково-дослідного сектору  
дослідження та статистики пожеж науково-  
дослідного центру нормативно-технічного  
регулювання Інституту наукових досліджень з  
цивільного захисту Національного університету

цивільного захисту України  
e-mail: ndv4niipb@ukr.net  
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7796-7952>

## RESEARCH OF FIRE SPREAD PROCESSES FROM WIND POWER PLANT USING COLUMN GAS-HYDRODYNAMICS

D. Sereda, Y. Balo., R. Koval, L. Nesenjuk

Institute of Scientific Research on Civil Protection of the National University of Civil Protection of Ukraine

*The intensive development of wind energy is accompanied by an increase in the unit capacity and geometric dimensions of wind turbines, which leads to an increase in their fire hazard. Particularly dangerous are accident scenarios of the "structural failure–fire" type, during which mechanical destruction of the nacelle and rotor occurs, followed by the spill and ignition of a significant amount of oil, as well as the burning of polymeric and composite blade materials.*

*In the presence of wind load, such fires are characterized by the rapid spread of thermal impact and can pose a threat to adjacent infrastructure facilities of various functional purposes.*

*Current regulatory approaches to determining fire separation distances from wind power plants (WPPs) are generally based on simplified calculation models or geometric parameters of fuel spills and do not account for the complex influence of the installation's capacity, oil quantity, tower height, and meteorological conditions, specifically wind speed and direction. This leads to significant uncertainty in assessing the actual zones of the thermal impact of a fire and a potential underestimation of the fire risk level.*

*An additional complicating factor is the lack of systematized experimental and calculated data regarding the actual thermal impact zones of fires from wind turbines of various capacities. Existing studies are generally limited to the analysis of individual accident cases or the consideration of fires within the confines of the nacelle structure, without assessing the spread of fire along the ground surface and in open space, taking into account wind conditions.*

*The problem acquires special relevance in the context of siting wind power plants near critical infrastructure facilities, agricultural lands, transport communications, and forest areas. Under such conditions, the uncontrolled spread of the fire's thermal impact can lead to secondary ignitions, cascading development of emergencies, and significant material damage, which is not accounted for in traditional approaches to assessing the fire hazard of WPPs.*

*The significant difference revealed by modeling results between the calculated oil spill radius and the actual radius of dangerous thermal fire impact indicates a methodological discrepancy between existing engineering estimates and real accident development conditions. In the presence of wind load, this difference can reach tens of percent, which significantly affects the correctness of determining safe fire separation distances.*

*In this regard, there is a need to form a scientifically grounded basis for accounting for the energy potential of the WPP fire load, specifically the quantity and physicochemical properties of the oil, the geometric parameters of the installation, and meteorological conditions. Solving this problem is possible only through the application of computational fluid dynamics as a tool for the integral analysis of combustion processes, heat transfer, and the propagation of fire hazards in open space.*

*In this connection, an urgent scientific and applied problem is the development and application of substantiated gas-dynamic models for the quantitative assessment of fire spread processes from wind turbines under the most unfavorable accident scenarios. Solving this problem will allow for clarifying dangerous thermal impact zones, increasing the reliability of determining safe fire separation distances, and ensuring an appropriate level of fire safety for wind energy facilities and adjacent territories.*

**Keywords:** wind turbine, fire safety, CFD modeling, "structural failure–fire" scenario, thermal impact, fire separation distances, risk assessment, wind load.

Дата надходження статті: 17.01.2026

Дата прийняття до друку: 15.03.2026

Дата публікації статті: 23.03.2026

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.