

Ю. А. Отрош, Н. В. Рашкевич, В. В. Ломакін, І. В. Мельник

Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

## МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ДИМОВИДАЛЕННЯ ПІДЗЕМНОГО ПАРКІНГУ ЖИТЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

У роботі проведено моделювання імпульсної системи димовидалення підземного паркінгу житлового комплексу з використанням програмного комплексу PyroSim. Визначено ефективність видалення диму, ідентифіковано зони накопичення продуктів горіння, оцінено безпечні шляхи евакуації та запропоновано рекомендації для проектування та експлуатації систем протидимного захисту.

**Ключові слова:** димовидалення, підземний паркінг, комп'ютерне моделювання, пожежна безпека, евакуація, PyroSim.

### Постановка проблеми

В умовах воєнного стану в Україні змінилися режими експлуатації житлових будівель, що зумовлює необхідність перегляду вимог до їх протипожежного захисту, насамперед до систем протидимного захисту. Використання підземних паркінгів та підвальних приміщень як найпростіших укриттів призводить до збільшення кількості та тривалості перебування людей у замкнених просторах, де виникають ризики задимлення у разі пожежі [1, 2].

Наслідки воєнних дій, зокрема пошкодження будівельних конструкцій, інженерних мереж і можливе блокування евакуаційних виходів, можуть обмежувати або унеможливити евакуацію [3, 4].

Додаткову небезпеку становлять порушення роботи систем димовидалення через перебої електропостачання або пошкодження обладнання, що знижує ефективність традиційних технічних рішень і вимагає пошуку надійних або адаптивних підходів до забезпечення вимог пожежної безпеки. Водночас, чинна нормативно-правова база переважно орієнтована на умови проектної експлуатації та не враховує специфіку експлуатації житлових будівель у період воєнного стану.

У зв'язку з цим актуальним науковим завданням є оцінка ефективності систем протидимного захисту підземних поверхів житлових будівель в умовах воєнного стану та розроблення обґрунтованих рекомендацій щодо підвищення їх надійності й ефективності з метою мінімізації ризиків для життя і здоров'я людей під час пожеж.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Одним із напрямів сучасних досліджень є чисельне моделювання процесів горіння та поширення диму у замкнених просторах.

Дослідники [1] показали, що у складних архітектурних конфігураціях без адекватних систем протидимного захисту формуються небезпечні зони задимлення. Аналогічні висновки отримані в роботі [2], які підкреслюють роль конфігурації приміщення у визначенні ризиків пожежі навіть у найпростішому укритті.

Безпека людей в укриттях потребує розробки надійних рішень для вентиляції та видалення диму. Автори [3] досліджували збільшення часу перебування людей у підземних укриттях під час бойових дій, що актуалізує необхідність прогнозування поведінки диму у реальних умовах експлуатації.

В [5] показано, що ефективність систем протидимного захисту впливає на здатність людей безпечно залишити приміщення під час пожежі. Аналіз характеристик продуктів горіння та їх впливу на людину [4, 6], підкреслює необхідність науково обґрунтованого підходу до організації протидимного захисту.

Сучасні технічні рішення для систем димовидалення розробляються за допомогою комп'ютерних моделей. Авторами [7] проведено розрахунок елементів системи димовидалення в ПК Ventus, демонструючи можливості оптимізації вентиляційних компонентів. Дослідники [8] оцінювали імпульсні системи димовидалення, які дозволяють створювати спрямовані повітряні потоки та ефективно видаляти дим із замкнених приміщень, відкриваючи нові перспективи для проектування підземних споруд з підвищеними вимогами до безпеки.

У дослідженні [9] розглядається захист від диму в підземних паркінгах із використанням струменевих вентиляторів. Встановлено, що такі системи значно ефективніші за традиційні повітропроводи, швидко витісняють дим і

забезпечують безпечну евакуацію людей відповідно до нормативних вимог.

Автор [10] досліджує протипожежний захист п'ятиповерхової будівлі та контроль диму у разі пожежі. Розрахунки охоплюють пожежне навантаження, час спрацювання сповіщувачів, мінімальну кількість та параметри пристроїв для видалення диму. Незважаючи на корисність методики, пряме застосування до підземних паркінгів обмежене через різний функціонал приміщень.

Дослідники [11] підкреслюють актуальність CFD-моделювання для контролю диму в підземних паркінгах, зокрема, при загорянні електромобілів. Використання CFD дозволяє знаходити ефективні рішення для видалення диму та захисту людей і майна, хоча існують обмеження при складних сценаріях пожежі.

В [12] проведений аналіз надійності інтегрованих систем пожежної сигналізації та струменевої вентиляції. Проведені випробування дозволяють оцінити ефективність та ремонтпридатність систем, що важливо для експлуатації підземних автостоянок.

Дослідники [13] представили чисельну модель підземного паркінгу на основі PHOENICS, яка дозволяє відтворювати розподіл чадного газу (CO) та температури під час пожежі. Результати моделювання використовуються для оптимізації систем вентиляції та підвищення безпеки людей.

В [14] оцінено ефективність систем протипожежного захисту у 14 поверхових будівлях. Показано, що неналежне обслуговування або неправильно підібрані елементи знижують безпеку: найвищий ефект показали переносні вогнегасники (77,6%), система контролю диму – 50%, поділ на відсіки, гідранти та аварійне освітлення – 64,3%. Результати підтверджують актуальність комплексного підходу до пожежної безпеки.

Дослідники [15] моделюють розповсюдження диму у висотній офісній будівлі за допомогою FDS. Розглянуто два сценарії пожежі та два місця загоряння, оцінено концентрації чадного газу (CO) на різних поверхах, що дозволяє аналізувати моменти евакуації та період до початку руху людей.

Науковці [16] створили колекцію змодельованих відеопожеж для вивчення поведінки людей. Це дослідження дозволяє оцінити психологічні фактори, що впливають на початкову реакцію на пожежу, і може використовуватись для вдосконалення профілактичних заходів та тренувань.

В [17] змодельоване розташування повітрязабірника та протипожежних дверей у вестибюлі. Показано, що оптимізація відносного положення та висоти встановлення вентиляційних

елементів значно покращує контроль диму, що є важливим для проектування систем протидимного захисту.

В [18] було застосовано стандарт Fire Research Station, UK, для розрахунку витрати вентилятора димовидалення для підвалу розмірами 30 x 20 x 4 м з використанням коду обчислювальної гідродинаміки (CFD) у перехідному режимі. Дослідження актуальне для оцінки ефективності вентиляційних систем у закритих приміщеннях.

Так як підвал залежно від розмірів доцільно розділити на протипожежні відсіки, актуально розглянути дослідження [19] щодо вивчення кількісного методу оцінки ризику розповсюдження пожежі. Розвиток пожежі представлено в 3-х етапах: пожежа повністю розвилась в пожежному відсіку, відмова слабкого бар'єру та горіння горючих речовин в відсіку. Сформульовано лінійно регресійна модель для забезпечення обчислювальної ефективності для прогнозування часу розповсюдження пожежі. Запропоновано метод кількісної оцінки ризику поширення пожежі в закритих будинках на основі моделі Probit. Метод корисний для оцінки ефективності заходів протидимного захисту.

Автор [20] провів аналіз пожеж в житлових будинках, їх небезпеку для мешканців та рятувальників, специфіку забезпечення пожежної безпеки в таких будинках та розвитку пожеж в них, на основі фізичних даних, як будівельні матеріали та конструкції реагують на вогонь. Робота частково відповідає темі дослідження та дає загальне уявлення про пожежну безпеку житлових приміщень.

Наукові дослідження зосереджені на чисельному моделюванні процесів горіння та поширення диму у замкнених приміщеннях, що дозволяє виявляти небезпечні зони задимлення залежно від конфігурації приміщення та наявності систем протидимного захисту. Це важливо для підземних укриттів і паркінгів, де безпека людей залежить від ефективної вентиляції та видалення диму, а також від врахування фізичних характеристик продуктів горіння.

Чисельні методи дозволяють прогнозувати поведінку диму, оптимізувати розташування вентиляторів та інших елементів систем димовидалення, підвищуючи ефективність евакуації та зменшуючи концентрацію небезпечних газів. Водночас, врахування поведінки людей під час пожежі, зокрема періоду до початку руху та психологічних факторів, сприяє покращенню заходів безпеки та підготовку до небезпеки.

## Мета та завдання статті

Мета дослідження – провести аналіз ефективності системи протидимного захисту підземних поверхів житлових будинків в умовах воєнного стану та розробка рекомендацій щодо її удосконалення для забезпечення безпеки людей під час пожеж з використанням комп'ютерного моделювання у середовищі PyroSim.

Об'єкт дослідження – підземний паркінг житлового комплексу як об'єкт з підвищеною пожежною небезпекою та обмеженими можливостями евакуації людей.

Предмет дослідження – комп'ютерна модель імпульсного димовидалення, що забезпечує ефективний протидимний захист підземних поверхів житлових будинків.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

1. Проаналізувати статистику пожеж і надзвичайних ситуацій у житлових будинках, визначити основні причини їх виникнення та особливості розвитку, а також дослідити стан виконання вимог державних будівельних норм України щодо протидимного захисту.

2. Оцінити ефективність імпульсної системи димовидалення підземного паркінгу шляхом

комп'ютерного моделювання в програмному комплексі PyroSim.

3. Визначити практичні напрями застосування результатів моделювання та функціональні можливості розробленої комп'ютерної моделі системи димовидалення підземного паркінгу.

## Виклад основного матеріалу

Аналіз статистики пожеж та надзвичайних ситуацій показує, що серед усіх типів об'єктів поширеними є пожежі у житлових будинках та спорудах житлового призначення [21, 22]. Основними причинами виникнення пожеж є: необережне поводження з вогнем, порушення правил пожежної безпеки при експлуатації електроустановок, несправності опалювальних приладів, використання легкозаймистих матеріалів та підпали. Додатковими факторами поширення пожеж є людський фактор, зокрема паніка під час евакуації, перебування маломобільних груп населення, порушення технологічних норм і захарачення евакуаційних шляхів, а також технічні проблеми в роботі систем протипожежного захисту. Приклади пожеж (рис. 1) показують, що характер небезпеки у житлових будинках є неконтрольованим та може призводити до значних людських втрат і матеріальних збитків [22, 23].

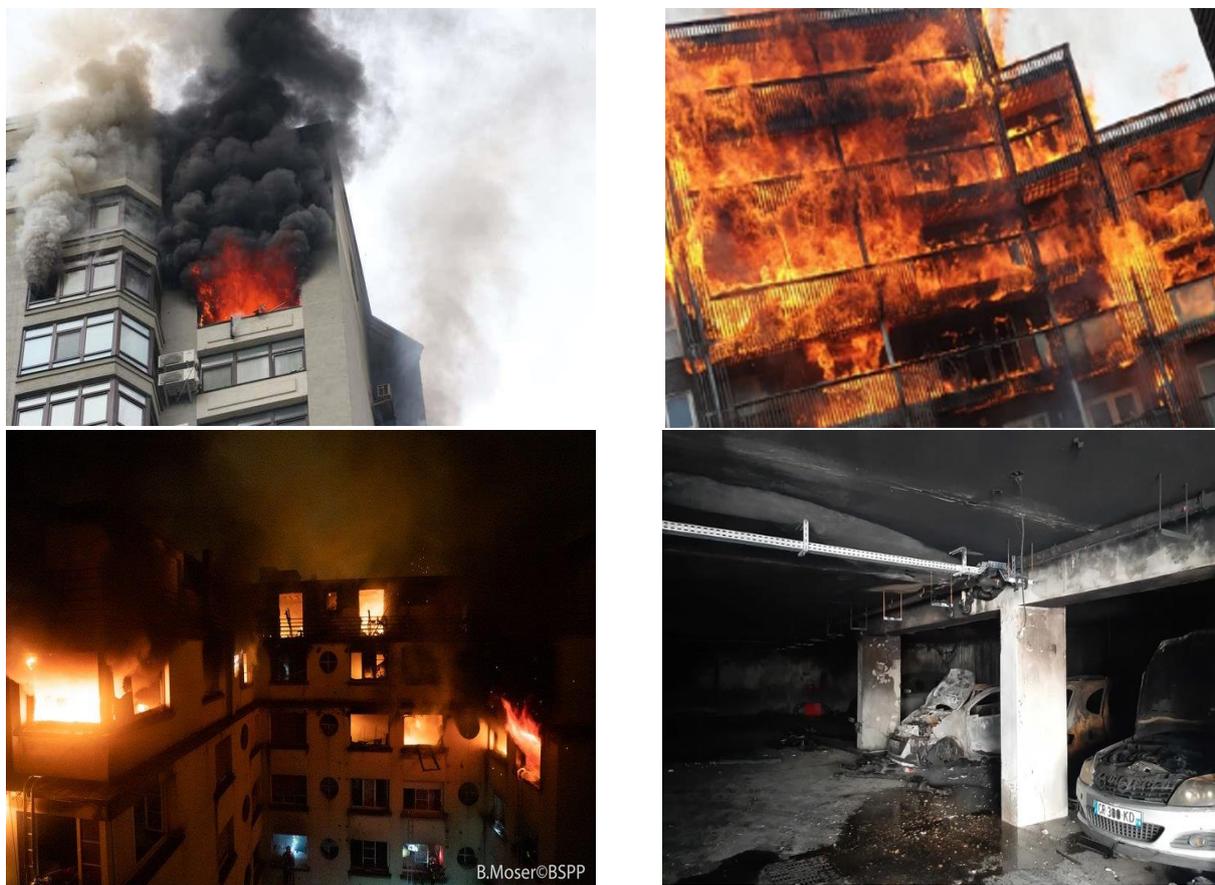


Рис. 1. Зображення наслідків небезпеки виникнення та поширення пожеж.

Дослідження стану виконання вимог державних будівельних норм України показує, що сучасні житлові будинки мають забезпечувати ефективний протидимний захист відповідно до ДБН В.1.1-7-2016, ДБН В.2.5-56:2014, ДБН В.2.2-15:2019 та ДБН В.2.5-41:2019, із врахуванням функціонального призначення будівлі та сучасних європейських вимог щодо гармонізації стандартів пожежної безпеки [24–28]. Для підвальних приміщень та паркінгів застосовуються спеціальні вимоги щодо створення різниці тисків і організації евакуаційних шляхів [28, 29]. Незважаючи на існуючі нормативи, на практиці часто спостерігаються порушення в експлуатації систем протидимного захисту, недостатнє технічне обслуговування та невідповідність елементів систем вимогам, що підвищує ризики поширення пожежі та задимлення [30].

Таким чином, статистичні дані та аналіз нормативної бази підтверджують необхідність посиленої уваги до систем протидимного захисту, своєчасного обслуговування систем пожежної сигналізації та забезпечення належного функціонування евакуаційних шляхів. Увагу слід приділяти підвальним приміщенням, багатоповерховим та висотним будівлям, де ризик поширення диму та складність евакуації найбільші. Виконання вимог державних будівельних норм та гармонізація з європейськими стандартами дозволять знизити ризики для мешканців та підвищать ефективність заходів пожежної безпеки.

Для проведення оцінки ефективності імпульсної системи димовидалення підземного паркінгу об'єктом моделювання обрано підземний паркінг сучасного житлового комплексу «Грані» (далі - ЖК «Грані»).

Вибір параметрів комп'ютерного моделювання системи димовидалення здійснювався з урахуванням функціонального призначення об'єкта, вимог чинних нормативних документів у сфері пожежної безпеки, а також рекомендацій щодо застосування CFD-моделей для аналізу протидимного захисту підземних споруд.

ЖК «Грані» складається з двох секцій (19 та 25 поверхів (в дослідженні розглянемо паркінг першої секції)), всього в комплексі 340 квартир, монолітний залізобетонний каркас, дахова котельня, ліфт з вантажопідйомністю 1000 кг, система пожежної сигналізації, димовидалення та пожежогасіння, паркінг (2 рівня) підземний та наземний, 1-2 поверх комерція. Паркінг розташований на одному підземному рівні загальна площа складає 2400 м<sup>2</sup>. Простір розрахований приблизно на 50 легкових автомобілів, які розташовані рядами з організованими проїздами для маневрування.

Паркінг обладнаний централізованою системою механізованого димовидалення. Вентилятори рівномірно розподілені по площі для забезпечення ефективного забору та відведення диму. Загалом передбачено близько 16 точок примусового видалення диму, що дозволяє забезпечити рівномірне очищення повітряного середовища навіть при найгіршому сценарії пожежі.

У структурі об'єкта також передбачено кілька евакуаційних виходів:

- два основних сходові вузли, розташовані по периметру паркінгу;
- рампи, які забезпечують швидку евакуацію персоналу та відвідувачів.

Периметр паркінгу розділено стінами на основні та допоміжні зони, серед яких – приміщення інженерних систем, електрощитові та допоміжні технічні кімнати. Всі перегородки виконані з вогнестійких матеріалів для запобігання поширення пожежі.

Увагу приділено організації шляхів евакуації. Евакуаційні маршрути вільні від перешкод і ведуть до безпечних виходів.

В умовах воєнного стану та введення в експлуатацію секцій, підземний паркінг використовується як тимчасове укриття для цивільного населення.

Було розглянуто сценарій розвитку пожежі:

- загоряння одного легкового автомобіля у центральній частині паркінгу;
- параметри пожежі: теплова потужність близько 5 МВт;

– робота системи димовидалення активована автоматично через 60 с після початку пожежі;

– вентилятори працюють на максимальній потужності, забезпечуючи видалення диму через верхні шахти.

У моделі змодельована імпульсна система димовидалення, яка забезпечує спрямований рух димових газів за рахунок встановлення струминних (імпульсних) вентиляторів. Вентилятори змонтовані під стелею паркінгу та спрямовані в бік витяжних шахт. Система не потребує повітропроводів і передбачає утворення аеродинамічного каналу для виведення диму. Модель вентилятора JAF-CI-315-U.

Кількість імпульсних вентиляторів – 16 шт. Продуктивність одного вентилятора – 5000 м<sup>3</sup>/год. Швидкість повітряного струменя – 1,18 м/с.

Імпульсна система дозволяє організувати контрольований рух диму в заданому напрямку, мінімізуючи його накопичення в зоні евакуації.

Для досягнення достатньої точності було використано розбиття на обчислювальну сітку розміром 0,2 x 0,2 x 0,2 м, для точності розрахунку.

Методика отримання результатів включала наступні етапи:

- побудова геометрії приміщення з урахуванням конструктивних елементів;
- задання характеристик джерела займання (пожежного навантаження);
- моделювання систем імпульсного димовидалення на базі струменевих вентиляторів;
- налаштування обчислювальної сітки;
- розміщення датчиків температури, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, та видимості на рівні 1,7 м;
- запуск симуляції тривалістю 300 с;

– аналіз отриманих результатів у вигляді графіків, ізотерм, та відео анімації.

Основними критеріями для аналізу результатів є:

- температура в зоні дихання (1,7 м від підлоги) (рис. 2);
- концентрація чадного газу (CO) (рис. 3);
- концентрація вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) (рис. 4);
- рівень видимості (рис. 5).

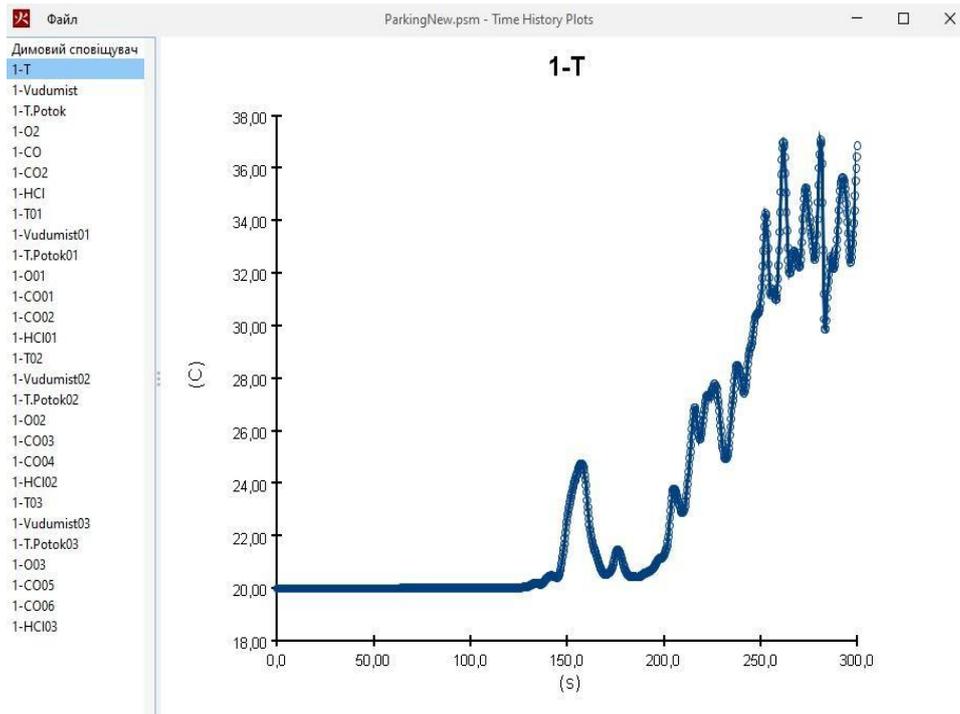


Рис. 2. Графік зміни температури на тепловому датчику.

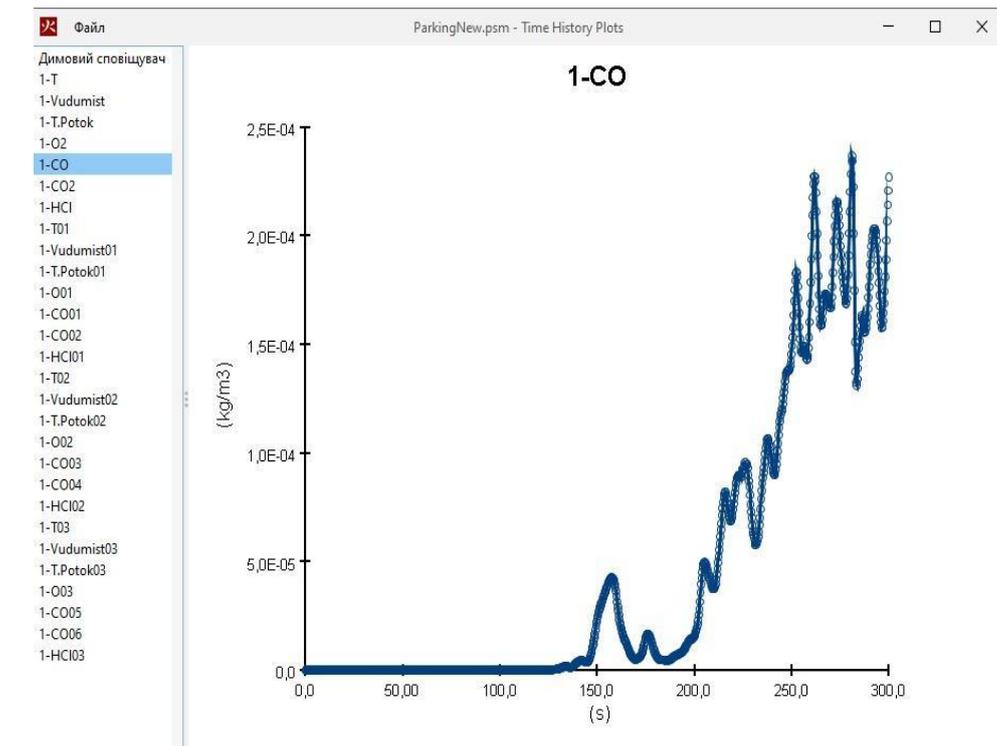


Рис. 3. Графік зміни концентрації чадного газу.

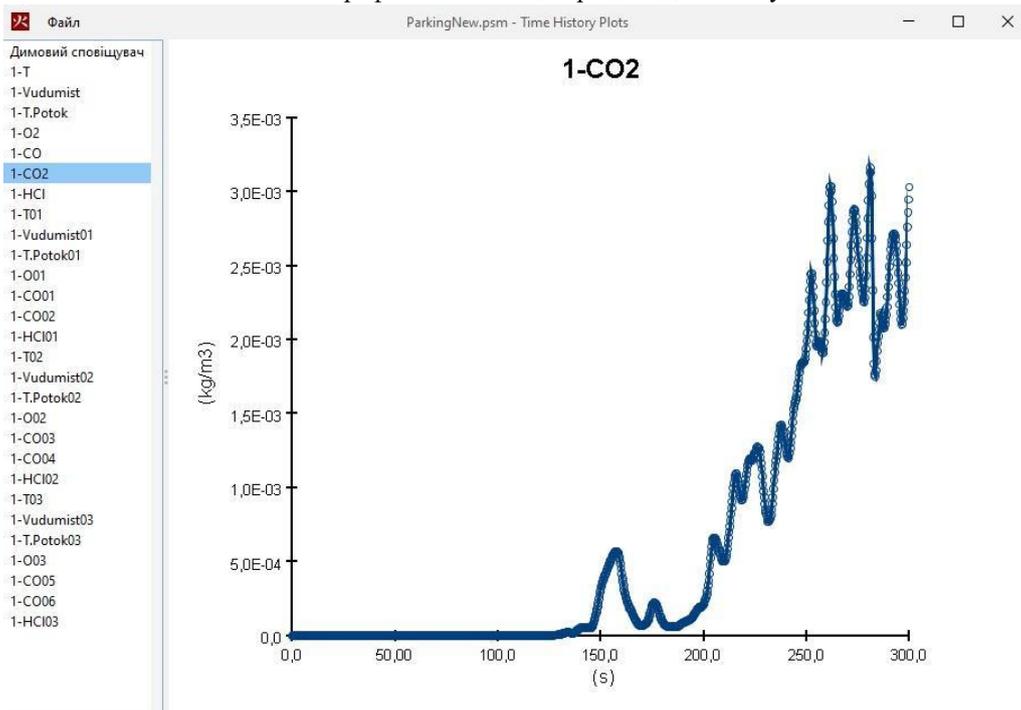


Рис. 4. Графік зміни концентрації вуглекислого газу.

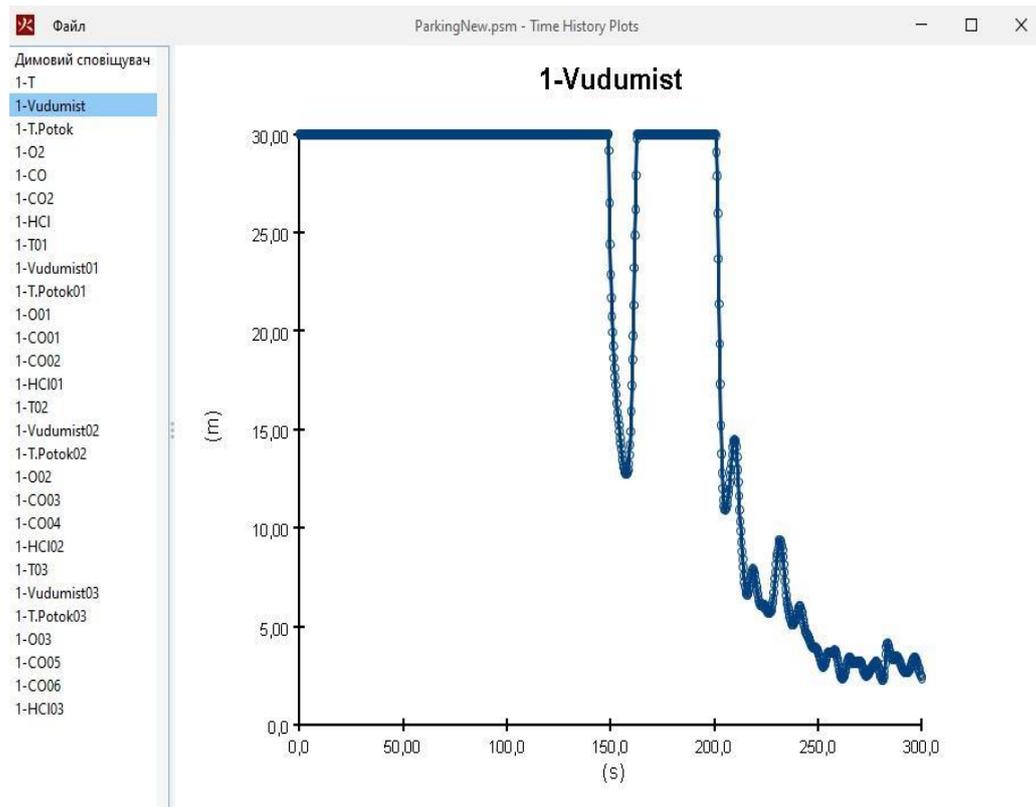


Рис. 5. Графік зміни видимості.

На початку моделювання спостерігається поступове зростання температури в зоні займання. Температура на рівні дихання (1,7 м) не перевищує критичних значень протягом 300 с, що дозволяє забезпечити евакуацію.

Концентрація диму та CO підтримується на доступному рівні завдяки роботі систем.

Візуалізація руху димового шару у напрямку витяжних каналів на різних проміжках часу (60, 120, 180 та 300 с) наведена на рис. 6–9. Слід зазначити відсутність повного задимлення евакуаційних шляхів, що підтверджує ефективність обраного рішення.

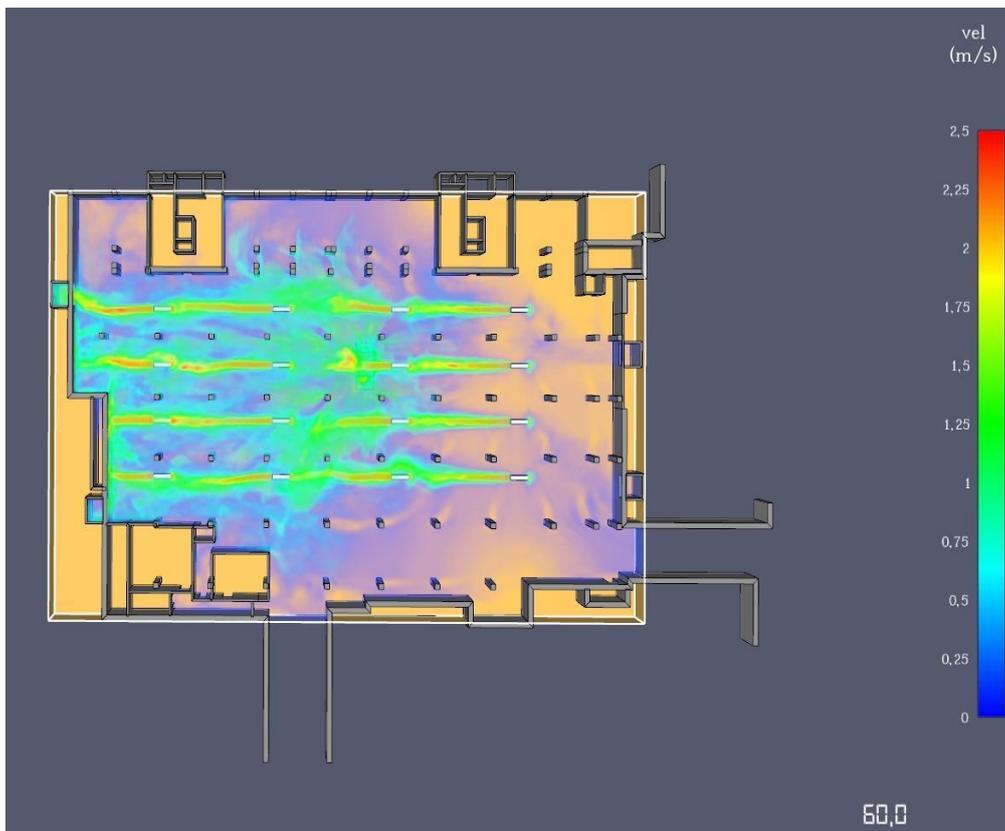


Рис. 6. Візуалізація руху димового потоку на 60 с.

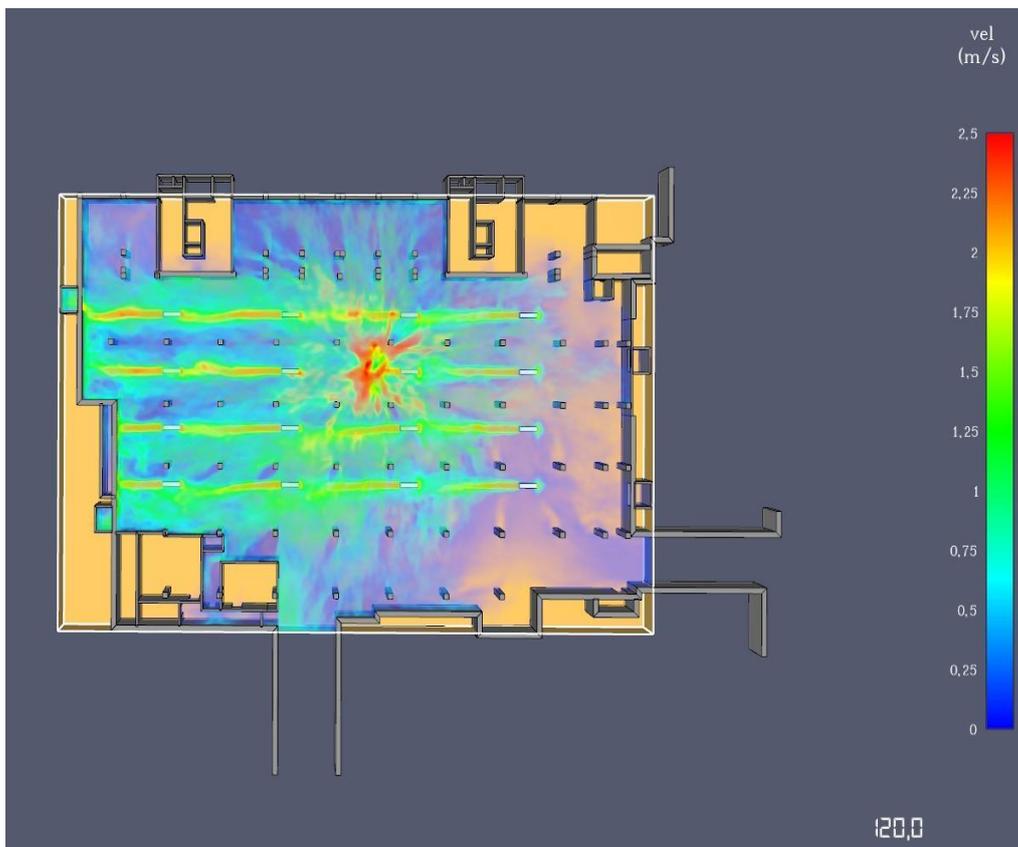


Рис. 7. Візуалізація руху димового потоку на 120 с.

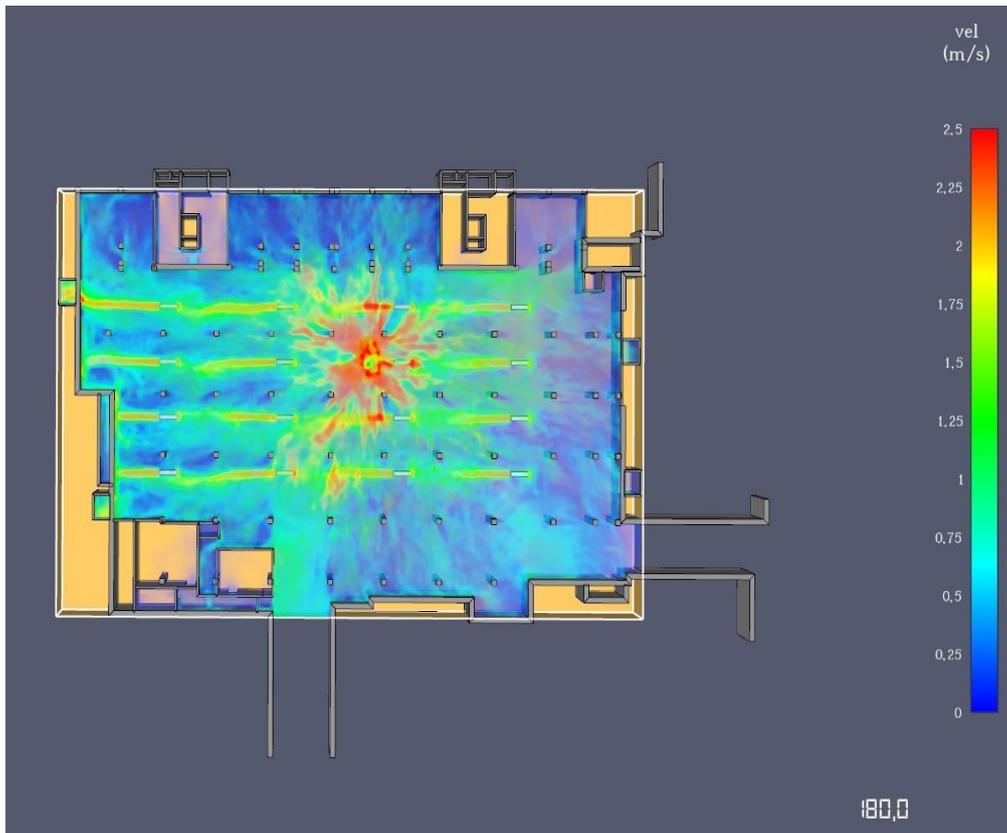


Рис. 8. Візуалїзація руху димового потоку на 180 с.

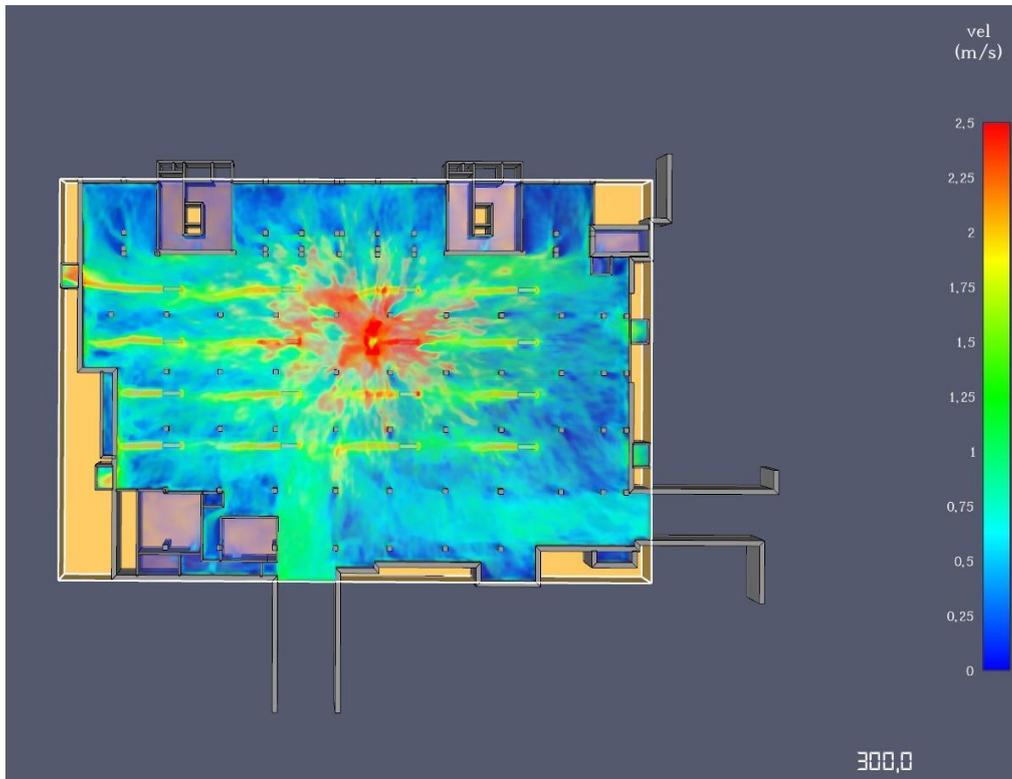


Рис. 9. Візуалїзація руху димового потоку на 300 с.

Результати показують, що імпульсна система димовидалення ефективно локалізує дим у межах об'єму та направляє його до витяжних шахт. Це

забезпечує прийнятні умови для евакуації протягом нормативного часу.

За результатами моделювання, система димовидалення забезпечує відповідність умовам [32], зокрема:

- температура на рівні дихання не перевищує 60 °С;
- рівень видимості не опускається нижче 3 м;
- концентрація CO та CO<sub>2</sub> в межах допустимих норм.

Вибір основних параметрів моделювання забезпечив адекватність чисельної моделі реальним умовам експлуатації підземного паркінгу та дозволив отримати достовірні результати щодо ефективності імпульсної системи димовидалення й безпеки евакуації людей.

У моделі враховано імпульсну систему димовидалення на базі струменевих вентиляторів, розміщених під стелею та орієнтованих у напрямку витяжних шахт. Кількість вентиляторів, їх продуктивність та швидкість повітряного струменя приймалися відповідно до технічних характеристик обраного обладнання та забезпечували формування спрямованого повітряного потоку без застосування повітропроводів. Час увімкнення системи після початку пожежі встановлено на рівні 60 с, що відповідає типовому алгоритму автоматичного керування системами протидимного захисту.

Моделювання показало, що за умови увімкнення імпульсної системи димовидалення параметри середовища залишаються в межах норми.

Отримані результати підтверджують доцільність використання імпульсних систем димовидалення у проектуванні підземних паркінгів для забезпечення безпеки людей під час пожежі.

Рекомендується оптимізувати розташування вентиляторів для покращення спрямованості повітряного потоку, використовувати датчики CO для керування вентиляції та проводити подальші симуляції із урахуванням різного типу пожежного навантаження.

Розроблена модель системи імпульсного димовидалення підземного паркінгу ЖК «Грані» має практичні можливості застосування:

1. Оцінка ефективності протипожежних рішень – модель дозволяє перевіряти розташування вентиляторів, кількість і потужність точок видалення диму, наявність евакуаційних виходів і вогнестійких перегородок, що допомагає виявляти критичні зони задимлення та коригувати схеми розміщення обладнання для підвищення безпеки.

2. Прогнозування поширення диму – модель дозволяє визначати потенційно небезпечні зони, оцінювати час досягнення критичних концентрацій шкідливих продуктів горіння і температури, а також планувати евакуаційні маршрути з урахуванням цих факторів, що особливо актуально для підземних паркінгів.

3. Обґрунтування проектних і експлуатаційних рішень – модель застосовується під час розробки нових об'єктів, реконструкції існуючих або модернізації систем протидимного захисту, дозволяє перевіряти відповідність державним будівельним нормам України та міжнародним стандартам, проводити віртуальні випробування систем димовидалення та визначати оптимальні параметри їх роботи.

3. Підтримка діяльності проектних організацій і підрозділів ДСНС – модель використовується для оцінки ризиків, розробки рекомендацій щодо розміщення обладнання, підготовки планів евакуації, навчання персоналу та проведення тренувань з реагування на пожежі. Це дозволяє зменшити ризики для життя людей, оптимізувати витрати на протипожежні заходи та підвищити ефективність систем димовидалення в реальних умовах експлуатації.

## Висновки

1. Пожежі у житлових будинках є поширеним видом надзвичайних подій з високим ризиком для життя людей. Основними причинами їх виникнення є людський фактор, технічні несправності та порушення правил експлуатації. Аналіз стану виконання норм протидимного захисту вказує на наявність як позитивних, так і проблемних моментів. Для підвищення безпеки необхідно дотримуватись вимог ДБН та ДСТУ, своєчасно обслуговувати системи протидимного захисту, а також інтегрувати сучасні європейські підходи до проектування та експлуатації житлових будівель.

2. Проведене комп'ютерне моделювання в ПК PyroSim дозволило оцінити ефективність імпульсної системи димовидалення підземного паркінгу під час пожежі. Результати показали, що система забезпечує своєчасне видалення диму з небезпечних зон паркінгу, запобігаючи його накопиченню біля евакуаційних виходів, формує спрямовані потоки повітря, що підтримують видимість на евакуаційних маршрутах на безпечному рівні, знижує концентрацію шкідливих продуктів горіння та температуру у зонах перебування людей до прийнятних значень протягом критичного періоду пожежі.

3. Розроблена комп'ютерна модель імпульсної системи димовидалення підземного паркінгу є ефективним інструментом для оцінки протипожежних рішень та прогнозування поширення диму. Вона дозволяє аналізувати небезпечні зони задимлення, перевіряти схеми евакуації та обґрунтовувати проектні та експлуатаційні рішення. Модель має широкі практичні можливості для застосування у проектних організаціях і підрозділах ДСНС України, сприяє

підвищенню безпеки людей, оптимізації систем димовидалення та ефективній підготовці персоналу до надзвичайних ситуацій.

Подальше вдосконалення системи протидимного захисту доцільно спрямувати на підвищення її адаптивності та стійкості до змінних умов пожежі. Перспективним є оптимізація розташування й орієнтації імпульсних вентиляторів на основі результатів CFD-моделювання з метою зменшення застійних зон продуктів горіння. Важливим напрямом є впровадження адаптивних алгоритмів керування вентиляцією з використанням даних датчиків температури, концентрацій СО та видимості. Доцільно також підвищувати надійність системи шляхом резервування живлення та аналізу її роботи за умов часткової відмови обладнання. Розширення сценаріїв моделювання, зокрема пожеж електромобілів або множинних осередків загоряння, дозволить комплексніше оцінити межі ефективності системи. Інтеграція системи димовидалення з системою керування евакуацією зможе додатково підвищити рівень безпеки людей у підземних паркінгах.

### Література

1. Олейник, О. С., Отрош, Ю. А., Рашкевич, Н. В., Скотков, Л. Проблематика збільшення часу перебування людей в укритті під час бойових дій за допомогою природної вентиляції: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми пожежної безпеки 2022» («Fire Safety Issues 2022»). – Харків: НУЦЗУ, 12 жовтня 2022 р. – С. 107–109.
2. Грищенко, А. А., Отрош, Ю. А., Рашкевич, Н. В. Моделювання зони задимлюваності в найпростішому укритті: матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». – Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобіля НУЦЗ України, 2024 р. – С. 163–164.
3. Олейник, О. С. Моделювання можливої зони задимлюваності в зруйнованому укритті [Текст] / О. С. Олейник, Ю. А. Отрош, Н. В. Рашкевич, С. В. Шаповал // Комунальне господарство міст. – 2023. – Том 4, випуск 178. – С. 210–218. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-210-218>
4. Подупан, В. А., Рашкевич, Н. В. Особливості розповсюдження продуктів загоряння: матеріали круглого столу (вебінару) «Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідків». – Харків: НУЦЗУ, 23 лютого 2023 р. – С. 62–63.
5. Кукузенко, А. М., Рашкевич, Н. В., Отрош, Ю. А. Визначення стану безпеки шляхів евакуації: матеріали Міжнародної науково-методичної конференції (Міжнародна наукова конференція ЕАС) «Безпека людини у сучасних умовах». – Харків: НТУ «ХП», 1-2 грудня 2022 р. – С. 114–116.
6. Отрош, В. Ю., Рашкевич, Н. В. Захист людей від впливу небезпечних чинників пожежі: матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів, студентів, аспірантів та ад'юнктів «Проблеми та перспективи розвитку охорони праці». – Львів: ЛДУ БЖД, 09 травня 2024 р. – С. 172–174.
7. Отрош, Ю. А. Розрахунок елементів системи димовидалення в ПК Ventus [Текст] / Ю. А. Отрош, Н. В. Рашкевич, А. І. Ковальов, П. Г. Балдук // Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. – 2024. – Том 8. – № 2. – С. 84–93. – DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2024.8.2.84.93>
8. Холодна, О. С., Рашкевич, Н. В. Аналіз імпульсної системи димовидалення: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Problems of Emergency Situations». – Харків: НУЦЗ України, 2023 р. – С. 161–162.
9. Teimuraz, P. Smoke Protection for Underground Car Parks in Fire / P. Teimuraz // Mining Journal. – 2024. – Vol. 1. – Is. 47. – DOI: 10.36073/1512-407X/2024-109-115
10. Na'inna, A. M. Fire Safety Design of a Five Storey Office Building: Fire Design and Smoke Control / A. M. Na'inna, M. S. Lawal, A. S. Bature // BIMA Journal of Science and Technology. – 2024. – Vol. 8. – № 3B. – P. 28–38. – DOI: 10.56892/bima.v8i3B.77
11. Stan, C. Smoke and Hot Gas Removal in Underground Parking Through Computational Fluid Dynamics: A State of the Art and Future Challenges // C. Stan, I. Năstase, F. Bode, R. Calotă // Fire. – 2024. – Vol. 7. – Is. 11. – P. 375. – DOI: <https://doi.org/10.3390/fire7110375>
12. Klimczak, T. Fire alarm systems in use in buildings and underground garages-reliability of operation / T. Klimczak, J. Paś, A. Rosiński // WUT Journal of Transportation Engineering. – 2024. – Vol. 138. – P. 77–88. DOI: 10.5604/01.3001.0054.6682
13. Wang, Z. Numerical simulation of the ventilation and fire conditions in an underground garage with an induced ventilation system / Z. Wang, X. Zhou, X. Zhu, J. Liu // Buildings. – 2023. – Vol. 13. – Is. 8. – P. 2074. <https://doi.org/10.3390/buildings13082074>
14. Pravin, T. Evaluation of Fire Protection Systems in Multiple Use High-rise Buildings for Fire Safety Optimization / T. Pravin, M. Kamlesh // International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT). – 2024. – Vol. 4. – Is. 7. – P. 183–192. – DOI: 10.48175/IJARSCT-18631
15. Shu, C., Wang, L. L. Smoke Spreading Simulation of High-Rise Office Building Based on Evacuation Analysis. In International Conference on Building Energy and Environment. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. – P. 1567–1576. DOI: 10.1007/978-981-19-9822-5\_161
16. Bonny, J. W. Simulated fire video collection for advancing understanding of human behavior in building fires / J. W. Bonny, Z. Hussain, M. D. Russell, A. Trouvé, J. A. Milke // Frontiers in Psychology. – 2024. – Vol. 15. – P. 1438020. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1438020>
17. Yang, H. Numerical study on the smoke control effect of the air inlet setting in the vestibule of building / H. Yang, S. C. Li // In Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology. – Singapore: Springer Singapore. – 2018. – P. 181–193.
18. Nguyen, T. D. Computational fluid dynamic model for smoke control of building basement / T. D. Nguyen, H. M. Bui // Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. – 2023. – Vol. 7. – P. 100318. DOI: 10.1016/j.csee.2023.100318
19. Sun, H. Research on quantitative assessment method for fire spread risk in enclosed buildings / H. Sun, J. Ye // Fire Technology. – 2024. – Vol. 60. – Is. 5. – P. 3709–3738. DOI: 10.1007/s10694-024-01588-8
20. Medved, S. Buildings Fires and Fire Safety. In: Building Physics. / S. Medved // – Springer Tracts in Civil Engineering. – Springer, Cham. – 2022. – P. 407–451. – DOI: 10.1007/978-3-030-74390-1\_6
21. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 9 місяців 2024 року. – Режим доступу:

<https://idundcz.dsns.gov.ua/upload/2/2/3/2/7/9/3/analytichna-dovidka-pro-pojehi-092024.pdf>

22. Головне управління ДСНС України у м. Києві. – Режим доступу: <https://kyiv.dsns.gov.ua/news/nadzvicaini-podiyi/16843>.

23. У центрі Парижа сталася масштабна пожежа: багато загиблих і постраждалих. – Режим доступу: <https://prm.ua/u-tsentri-parizha-stalasya-masshtabna-pozhezha-bagato-zagiblih-i-postrazhdalih/>

## References

- Oliynyk, O. S., Otrosh, Yu. A., Rashkevich, N. V., Skatkov, L. (2022). *Problema zbil'shennya chasu perebuвання lyudey v ukrytti pid chas boyovykh diy za dopomohoyu pryrodnoyi ventilyatsiyi*. Materialy Mizhnarodnoyi naukovopraktychnoyi konferentsiyi "Fire Safety Issues 2022". Kharkiv: NUTSZU, 107–109 [in Ukrainian]
- Hryshchenko, A. A., Otrosh, Yu. A., Rashkevich, N. V. (2024). *Modelyuvannya zony zadymlyvanosti v nayprostishomu ukrytti*. Materialy KHIV Vseukrayins'koyi naukovopraktychnoyi konferentsiyi z mizhnarodnoyi uchasti "Nadzvychnayni sytuatsiyi: bezpeka ta zakhyst". Cherkasy: CHIPB im. Heroyiv Chornobylya NUTSZ Ukrayiny, 163–164 [in Ukrainian]
- Oleinyk, O. S., Otrosh, Yu. A., Rashkevich, N. V., Shapoval, S. V. (2023). Modeling of a possible smoke zone in a destroyed shelter. *Municipal Economy of Cities*, 4(178), 210–218. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-210-218> [in Ukrainian]
- Polupan, V. A., Rashkevich, N. V. *Osoblyvosti rozpovsyudzhennya produktu zahoryannya*. Materialy kruhloho stolu (vebinaru) "Zapobihannya vynyknennyu nadzvychaynykh sytuatsiy, reahuvannya ta likvidatsiya yikh naslidkiv". – Kharkiv: NUTSZU, 23 lyutoho 2023. – S. 62–63 [in Ukrainian]
- Kukuzenko A. M., Rashkevich N. V., Otrosh Yu. A. *Vyznachennya stanu bezpeky shlyakhiv evakuatsiyi*. Materialy Mizhnarodnoyi naukovometodychnoyi konferentsiyi (Mizhnarodna naukova konferentsiya EAS) "Bezpeka lyudyny v suchasnykh umovakh". Kharkiv, NTU "KHPI", 114–116 [in Ukrainian]
- Otrosh, V. Yu., Rashkevich, N. V. (2024). *Zakhyst lyudey vid vplyvu nebezpechnykh chynnykiv pozhezhi*. Materialy XIV Vseukrayins'koyi naukovopraktychnoyi konferentsiyi kursantiv, studentiv, aspirantiv ta ad'yunktiv "Problemy ta perspektyvy rozvytku okhorony pratsi". L'viv: LDU BZHD, 172–174 [in Ukrainian]
- Otrosh, Yu. A., Rashkevich, N. V., Kovalov, A. I., Balduk, P. H. (2024). Calculation of elements of the smoke exhaust system in the Ventus PC. *Emergency situations: prevention and elimination*, 8(2), 84–93. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2024.8.2.84.93> [in Ukrainian]
- Kholodna, O. S., Rashkevich, N. V. (2023). Analiz impul'snoyi systemy dymovydalennya. Materialy Mizhnarodnoyi naukovopraktychnoyi konferentsiyi "Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy". Kharkiv: NUTSZ Ukrayiny, 161–162 [in Ukrainian]
- Teimuraz, P. (2024) Smoke Protection for Underground Car Parks in Fire. *Mining Journal*, 1(47). DOI: 10.36073/1512-407X/2024-109-115
- Na'inna, A. M., Lawal, M. S., Bature, A. S. (2024). Fire Safety Design of a Five Storey Office Building: Fire Design and Smoke Control. *BIMA Journal of Science and Technology*, 8(3B), 28–38. DOI: 10.56892/bima.v8i3B.77
- Stan, C., Năstase, I., Bode, F., Calotă, R. (2024). Smoke and Hot Gas Removal in Underground Parking Through Computational Fluid Dynamics: A State of the Art and Future Challenges. *Fire*, 7(11), 375.
- Klimczak, T., Paś, J., Rosiński, A. (2024). Fire alarm systems in use in buildings and underground garages: reliability of operation. *WUT Journal of Transportation Engineering*, 138, 77–88.
- Wang, Z., Zhou, X., Zhu, X., Liu, J. (2023). Numerical simulation of the ventilation and fire conditions in an underground garage with an induced ventilation system. *Buildings*, 13(8), 2074.
- Pravin, T., Kamlesh, M. (2024) Evaluation of Fire Protection Systems in Multiple Use High-rise Buildings for Fire Safety Optimization. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT)*, 4(7), 183–192. DOI: 10.48175/IJARSCT-18631
- Shu, C., Wang, L. L. (2022, July). Smoke Spreading Simulation of High-Rise Office Building Based on Evacuation Analysis. In *International Conference on Building Energy and Environment* (pp. 1567–1576). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Bonny, J. W., Hussain, Z., Russell, M. D., Trouvé, A., Milke, J. A. (2024). Simulated fire video collection for advancing understanding of human behavior in building fires. *Frontiers in Psychology*, 15, 1438020.
- Yang, H., Li, S. C. (2018, October). Numerical study on the smoke control effect of the air inlet setting in the vestibule of building. In *Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology* (pp. 181–193). Singapore: Springer Singapore.
- Nguyen, T. D., Bui, H. M. (2023). Computational fluid dynamic model for smoke control of building basement. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 7, 100318.
- Sun, H., Ye, J. (2024). Research on quantitative assessment method for fire spread risk in enclosed buildings. *Fire Technology*, 60(5), 3709–3738.
- Medved, S. (2022). Buildings Fires and Fire Safety. In: *Building Physics. Springer Tracts in Civil Engineering*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-74390-1\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-74390-1_6)
- Analitichna dovidka pro pozhezhi ta yikh doslidzhennya v Ukrayini za 9 misyatsiv 2024 roku. – Rezhym dostupu: <https://idundcz.dsns.gov.ua/upload/2/2/3/2/7/9/3/analytichna-dovidka-pro-pojehi-092024.pdf> [in Ukrainian]
- Holovne upravlinnya DSNS Ukrayiny u m. Kyjevi. <https://kyiv.dsns.gov.ua/news/nadzvicaini-podiyi/16843> [in Ukrainian]
- U tsentri Paryzha stalasya masshtabna pozhezha: bahato zahybykh i postrazhdalykh. <https://prm.ua/u-tsentri-parizha-stalasya-masshtabna-pozhezha-bagato-zagiblih-i-postrazhdalih/> [in Ukrainian]

**Рецензент:** д-р техн. наук, доц. Сідней С.О., доцент кафедри пожежної і техногенної безпеки об'єктів та технологій Національного університету цивільного захисту України, м. Черкаси.

**Автор:** ОТРОШ Юрій Анатолійович  
 доктор технічних наук, професор, начальник кафедри державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки  
 Національний університет цивільного захисту України, Україна  
 E-mail – [otrosh\\_yurii@nuczu.edu.ua](mailto:otrosh_yurii@nuczu.edu.ua)  
 ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0698-2888>

**Автор:** РАШКЕВИЧ Ніна Владиславна  
 доктор філософії, доцент кафедри державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки

Національний університет цивільного захисту України  
E-mail – rashkevych\_nina@nuczu.edu.ua  
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5124-6068>

**Автор:** ЛОМАКІН Владислав Віталійович  
викладач кафедри державного нагляду у сфері  
пожежної та техногенної безпеки  
Національний університет цивільного захисту України  
E-mail – lomakin\_vladyslav@nuczu.edu.ua

ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5912-9196>

**Автор:** МЕЛЬНИК Ірина Володимирівна  
викладач кафедри державного нагляду у сфері  
пожежної та техногенної безпеки  
Національний університет цивільного захисту України  
E-mail – melnyk\_iryana@nuczu.edu.ua  
ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2291-2141>

## **SMOKE REMOVAL SYSTEM MODELING OF AN UNDERGROUND PARKING IN A RESIDENTIAL COMPLEX**

Yu. Otrosh, N. Rashkevich, V. Lomakin, I. Melnyk

National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

*The paper presents computer modeling of an impulse smoke control system for the underground parking garage of the residential complex “Grani” using the PyroSim software package. The modeling made it possible to evaluate the efficiency of the smoke removal system and to determine the conditions for safe evacuation of people in the event of a fire. The object of the study is the underground parking garage of the first section of the residential complex with a total area of 2400 m<sup>2</sup>, designed for 50 passenger cars. The parking facility includes traffic lanes, parking areas, and several evacuation exits that ensure fast and organized evacuation of occupants.*

*Computer modeling was performed taking into account the actual arrangement of vehicles, structural characteristics of the building, available engineering equipment, and the existing smoke control system. The system consists of 16 points of forced smoke extraction, evenly distributed over the parking area, which provides effective removal of combustion products from the air.*

*During the study, a fire scenario involving a single vehicle was considered. This made it possible to analyze the process of smoke spread, changes in smoke concentration, and their impact on visibility conditions in different zones of the parking garage. The simulation results showed that the impulse smoke control system effectively removes smoke from hazardous areas and maintains acceptable levels of toxic gases and sufficient visibility along evacuation routes. Potential zones of combustion product accumulation were also identified, which can be used for further optimization of fan placement and improvement of the system design.*

*The developed model allows prediction of smoke behavior during a fire, evaluation of different operating modes of the smoke control system, and justification of evacuation schemes. The obtained results can be used in the design and operation of underground parking facilities, as well as for fire risk assessment and improvement of safety levels in underground spaces of residential complexes.*

**Keywords:** smoke removal, underground parking, computer simulation, fire safety, evacuation.

*Дата надходження статті: 10.01.2026*

*Дата прийняття до друку: 07.03.2026*

*Дата публікації статті: 23.03.2026*

*Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.*