

УДК 614.841

## МОДЕЛЮВАННЯ ВОГНЕЗАХИСТУ СВІТЛОПРОЗОРИХ ФАСАДНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ВЛАШТУВАННЯМ ЗРОШУВАЧІВ

Майборода Р. І.<sup>1</sup>, Рашкевич Н. В.<sup>1</sup>, Отрош Ю. А.<sup>1</sup>, Балдук П. Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний університет цивільного захисту України

<sup>2</sup>Одеська державна академія будівництва та архітектури

**Анотація:** Популярність світлопрозорих матеріалів у будівництві, особливо в висотних будівлях, створює виклики щодо вдосконалення підходів до забезпечення пожежної безпеки. Світлопрозорі конструкції мають обмежену. Під час пожежі вони можуть швидко нагріватися, тріскатися або навіть руйнуватися, що сприяє проникненню вогню в інші частини будівлі та збільшує швидкість поширення пожежі.

В роботі розглянуті практичні способи та прийоми обмеження поширення пожежі по фасадах будівлі, серед яких застосування протипожежних карнизів, захисних екранів з вогнетривкого матеріалу, обмеження площі віконного отвору, а також застосування водяного зрошування. Водяне зрошування є ефективним методом гасіння пожежі і охолодження фасадних елементів, але його параметри, такі як робочий тиск, витрати води, розташування, тощо потребують ретельного дослідження для досягнення максимальної ефективності.

Метою даної роботи є за допомогою програмного комплексу PyroSim дослідити ефективність застосування зрошувачів для захисту світлопрозорих конструкцій фасаду висотних будівель та визначити їх основні параметри.

За допомогою PyroSim була створена детальна тривимірну модель, яка враховує складні геометричні форми будівлі та вплив протипожежних систем з урахуванням особливостей світлопрозорих фасадів. У ході досліджень також враховані структурні елементи, що можуть впливати на поширення вогню і диму, а саме характеристики матеріалів, пожежне навантаження, встановлення віконних отворів. PyroSim, моделюючи поширення пожежі, дозволив врахувати теплові і димові потоки, конвективний вплив, що виникають під час пожежі, а також взаємодію зрошувачів з тепловим навантаженням.

Результати моделювання можуть бути використані для оптимізації проектування протипожежних систем і забезпечення відповідності будівельних норм питанням пожежної безпеки. Зокрема, моделювання дозволяє визначити найбільш ефективні способи розміщення зрошувачів, враховуючи специфічні умови та конструкційні особливості будівлі. Завдяки цьому можна не лише підвищити рівень захисту будівель від пожеж, але й мінімізувати витрати на встановлення і обслуговування пожежних систем.

**Ключові слова:** пожежа, моделювання, руйнування, зрошувач, PyroSim.

## MODELING OF FIRE PROTECTION OF TRANSPARENT FACADE STRUCTURES WITH SPRINKLERS

R. Maiboroda<sup>1</sup>, N. Rashkevich<sup>1</sup>, Yu. Otrosh<sup>1</sup>, P. Balduk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National University of Civil Defence of Ukraine

<sup>2</sup>Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract:** The popularity of translucent materials in construction, especially in high-rise buildings, creates challenges for improving approaches to fire safety. Translucent designs have a limited. During a fire, they can quickly heat up, crack or even collapse, which helps the fire to spread to other parts of the building and increases the speed of fire spread.



Practical methods and methods of limiting the spread of fire on building facades are considered in the work, including the use of fire eaves, protective screens made of fire-resistant material, limiting the area of the window opening, as well as the use of water irrigation. Water irrigation is an effective method of extinguishing fire and cooling facade elements, but its parameters, such as working pressure, water flow, location, etc., require careful research to achieve maximum efficiency.

The purpose of this work is to use the PyroSim software complex to investigate the effectiveness of sprinklers for the protection of transparent structures on the facade of high-rise buildings and to determine their main parameters.

With the help of PyroSim, a detailed three-dimensional model was created, which takes into account the complex geometric shapes of the building and the impact of fire protection systems, taking into account the features of translucent facades. In the course of research, structural elements that can affect the spread of fire and smoke are also taken into account, namely the characteristics of materials, fire load, installation of window openings. PyroSim, simulating the spread of a fire, made it possible to take into account heat and smoke flows, convective effects occurring during a fire, as well as the interaction of sprinklers with the heat load.

The results of such modeling can be used to optimize the design of fire protection systems and ensure the compliance of building regulations with fire safety issues. In particular, modeling allows you to determine the most effective ways to place sprinklers, taking into account the specific conditions and structural features of the building. Thanks to this, it is possible not only to increase the level of protection of buildings against fires, but also to minimize the costs of installing and maintaining fire systems.

**Keywords:** fire, simulation, destruction, sprinkler, PyroSim.

## 1 ВСТУП

Темпи висотного будівництва, з використанням світлопрозорих конструкцій, неухильно зростають. Це явище має безліч переваг, таких як естетичність, природне освітлення, енергоефективність, панорамний вигляд. Однак, поряд з цими перевагами, зростає важливість питань пожежної безпеки. Світлопрозорі фасади, хоча і привабливі та функціональні, можуть створювати певні виклики з точки зору захисту від пожежі. При виникненні займання в одній частині будівлі, тепло може швидко передаватися через скляні конструкції до інших частин, збільшуючи ризик поширення вогню. Високі температури можуть спричинити тріщини або навіть розрив скляних конструкцій, що створює додаткові небезпеки для евакуації людей та роботи пожежних. Питання забезпечення пожежної безпеки висотних будівель є актуальним [1, 2].

Важливою складовою забезпечення безпеки є використання вогнестійких матеріалів у конструкціях рам та ущільнень світлопрозорих фасадів. Однак, навіть з урахуванням цих заходів, ефективність захисту може бути обмеженою без додаткових систем активного захисту. Одним з перспективних рішень є встановлення зрошувачів, які можуть значно підвищити рівень безпеки. Зрошувачі є частиною автоматичних систем пожежогасіння, які активуються при виявленні пожежі та забезпечують швидке охолодження конструкцій, запобігаючи їх руйнуванню та поширенню вогню.

## 2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

До заходів щодо обмеження поширення пожежі на фасаді відносяться активні та пасивні заходи протипожежного захисту будівель. До активним заходам відносять пристрій систем автоматичного пожежогасіння або водяного зрошення світлопрозорих фасадів будівель, до пасивних - конструктивні рішення фасадів або будівель, що перешкоджають виходу полум'я на фасад або локалізують його розміри в прийнятих межах (вертикальний міжповерховий пояс чи протипожежні козирки) [3].

Світлопрозорі конструкції повинні відповідати вимогам вогнестійкості, що забезпечує запобігання поширенню вогню на інші поверхи чи частини будівлі. Важливою умовою є правильне виконання стиків і з'єднань між окремими елементами фасаду для запобігання утворенню проміжків, через які може поширюватися вогонь [4]. Крім того, необхідно передбачити встановлення протипожежних бар'єрів, які ускладнюють поширення полум'я уздовж фасаду [5]. Міжповерхові пояси виконують роль бар'єрів, через які пожежа не повинна перейти на поверх. Однак у висотних будинках із зовнішнього боку виникають значні, вертикально спрямовані вітрові потоки, здатні впливати на характер зовнішньої пожежі.

Значна частина наукових праць присвячена розробці та вдосконаленню методів випробувань на вогнестійкість [6, 7]. Введення нових стандартів та протоколів тестування дозволяє отримувати більш достовірні та репрезентативні результати.

Вогнестійкість світлопрозорої конструкції залежить не тільки від вогнестійкості склопакета, але й від елементів несучих конструкцій та їх здатності чинити опір пожежі. Дослідження вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій [8, 9] є важливим кроком до підвищення пожежної безпеки висотних будівель з світлопрозорими конструкціями, забезпечуючи обмеження поширення вогню.

Досліджуються різні підходи до моделювання пожежних ситуацій, включаючи експериментальні випробування в лабораторних умовах та комп'ютерне моделювання [10].

Дослідники [11, 12] зосереджують свою увагу на розробці нових технологій, що підвищують вогнестійкість світлопрозорих фасадів. Використання нових матеріалів, модифікація архітектурних рішень та вдосконалення систем вентиляції та інженерних

комунікацій – все це стає об'єктом досліджень для забезпечення надійної захисту від пожежі.

Так, японський вчений [13] за результатами численних вогневих експериментів встановив, що горизонтальний козирок розміром 0,74 м, розташований над вікном приміщення, що горить, не дозволяє полум'я зруйнувати вище розташоване вікно. Результати цих досліджень зробили внесок у нормативні вимоги багатьох країн.

Зарубіжними вченими [14, 15] за результатами наукових досліджень зроблено висновок у тому, що у висоту полум'я пожежі, що виходить з вікна палаючого приміщення, впливає потужність вогнища пожежі, а також співвідношення розмірів віконного отвору. Справедливо припустити, що одним із активних методів обмеження поширення пожежі на фасаді будівлі може бути метод, заснований на зниженні розмірів (площі) віконного отвору, через який полум'я може виходити назовні.

У роботі [16] представлені наочні результати комп'ютерного моделювання, що характеризують позитивний вплив наявності козирків на обмеження впливу полум'я на фасад будівлі.

В роботі [17] наводяться результати натурних досліджень загартованого скла з використанням водяних зрошувачів. Зазначається, що система водяного спринклерного зрошення здатна підвищити стійкість скла в умовах пожежі протягом години.

Однак, водяне зрошення, як спосіб захисту, має численні протиріччя у своїй ефективності, а також вимагає врахування великої кількості критеріїв, які впливають на ефективність захисту.

### **3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Метою роботи є дослідження ефективності застосування зрошувачів для захисту світлопрозорих конструкцій фасаду висотних будівель та визначити їх основні параметри.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні наукові завдання:

- проаналізувати питання забезпечення вогнестійкості світлопрозорих конструкцій;
- обґрунтувати вибір інструментальної бази для визначення ефективності захисту зрошувачами світлопрозорих конструкцій фасаду висотних будівель
- за допомогою програмного комплексу PyroSim провести моделювання пожежі висотних будівлях зі світлопрозорих конструкцій фасаду з улаштуванням зрошувачів.

### **4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Пожежі у висотних будинках, що відбуваються у всьому світі, свідчать про характер їх поширення з зовнішньої сторони будівлі. Це є значним викликом для забезпечення пожежної безпеки.

На рисунках 1-5 наведені резонансні події, які пов'язані з пожежами в висотних будівлях.



**Рис. 1.** Пожежа у м. Дубаї, ОАЕ (20 липня 2016 року)



**Рис. 2.** Пожежа у будівлі Grenfell Tower м. Лондон, Великобританія (14 червня 2017 року).



**Рис. 3.** Пожежа у м. Мілан, Італія (29 серпня 2021 року).



Рис. 4. Пожежа у м. Чанша, Китай (16 вересня 2022 року).



Рис. 5. Пожежа у м. Дубаї, ОАЕ (27 червня 2023 року).

На розвиток пожежі по фасаду висотних будинків впливає: потужність вогнища пожежі (чим потужніше вогнище пожежі, тим більше тепла та полум'я виділяється, що сприяє швидшому нагріванню і займання фасадних матеріалів); горюча обробка фасаду, що використовується для облицювання, утеплення, ущільнення; зовнішні умови (вітер, конвективні потоки, які піднімають полум'я, гаряче повітря на більшу висоту вгору вздовж фасаду).

Вогнестійкість світлопрозорої конструкції є одним із основних аспектів при проектуванні і виборі матеріалів для фасадів будівель, визначаючи здатність конструкції протистояти впливу вогню протягом певного часу, запобігаючи його поширенню та забезпечуючи безпеку людей і збереження майна. Основними факторами, що впливають на вогнестійкість, є матеріали та конструктивні рішення.

Матеріали, що використовуються, включають спеціальне вогнестійке скло, яке може бути багатошаровим або ламінованим із застосуванням спеціальних плівок і наповнювачів, що здатне утримувати свою цілісність і ізолюючі властивості при високих температурах. Для рам і профілів використовуються алюмінієві або сталеві профілі з вогнестійким заповнювачем або покриттям, що підвищує їх вогнестійкість. Світлопрозорі конструкції повинні проходити обов'язкове тестування на вогнестійкість

у сертифікованих лабораторіях, де визначається час, протягом якого конструкція зберігає свої захисні властивості при впливі високих температур. Крім того, необхідно використовувати протипожежні бар'єри, ущільнювачі і герметики, що перешкоджають поширенню вогню і диму через стики і з'єднання конструкцій.

Конструктивні рішення мають враховувати тип конструкції і її взаємодію з іншими елементами будівлі, інтегруючи вогнестійкі світлопрозорі фасади з системами протипожежного захисту, такими як автоматичні системи пожежогасіння і димовидалення.

Застосування програмного комплексу PyroSim для визначення ефективності захисту зрошувачами світлопрозорих конструкцій фасаду висотних будівель полягає в проведенні детального моделювання та аналізу пожежних сценаріїв. PyroSim є потужним інструментом, що дозволяє симулювати поширення вогню та вплив систем протипожежного захисту, включаючи зрошувачі.

Використання PyroSim передбачає:

1. Створення тривимірної моделі будівлі.
2. Розміщення зрошувачів.
3. Моделювання пожежі.
4. Аналіз теплових потоків і температурних полів.
5. Візуалізація і звітність.
6. Оптимізація систем протипожежного захисту.

На основі результатів симуляції можна підібрати оптимальне розташування та параметри зрошувачів для підвищення ефективності захисту.

Використання PyroSim дозволяє здійснити комплексний аналіз ефективності захисту зрошувачами світлопрозорих конструкцій фасаду висотних будівель, забезпечуючи високий рівень протипожежної безпеки та захисту майна та життя людей.

Для визначення параметрів зрошувачів з метою захисту світлопрозорих конструкцій фасаду висотних будівель в програмному комплексі PyroSim було створено (рис. 6) фрагмент монолітної залізобетонної висотної будівлі (6 поверхів) з габаритними розмірами:

- загальна висота – 18 м;
- висота поверху – 3 м;
- ширина – 14 м;
- глибина 10 м;
- колони - 0,6 x 0,6 м
- зовнішні не несучі стіни – 0,12 м;
- перегородки – 0,12 м;
- перекриття – 0,2 м;
- довжина кімнати – 5,5 м;
- глибина кімнати – 7 м.

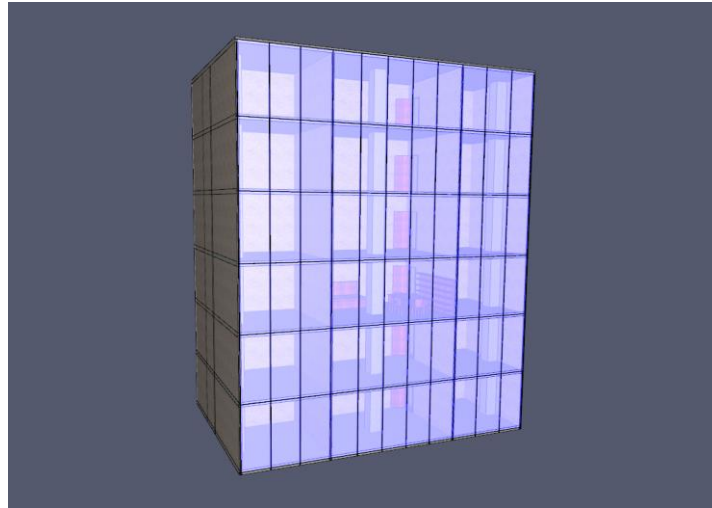


Рис. 6. Модель будинку відтвореного в PyroSim.

Основні конструктивні елементи будинку виконано з монолітного бетону типу «бетон важкий» густиною  $2280 \text{ кг/м}^3$ , питома теплоємність  $2,04 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$  та теплопровідністю  $1,35 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Температура навколишнього середовища –  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Напрямок та сила відру не враховувалось.

Фасад будівлі виконано із двокамерного склопакету. Розміри вікон –  $1,3 \times 3 \text{ м}$ . Густина скла –  $2500 \text{ кг/м}^3$ . Питома теплоємність –  $0,68 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ . Теплопровідність –  $0,06 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

Для можливості визначення значень теплового потоку, що надходить від пожежі, розміщено 15 датчиків на задній від місця пожежі поверхні скла вікон (рис. 7).

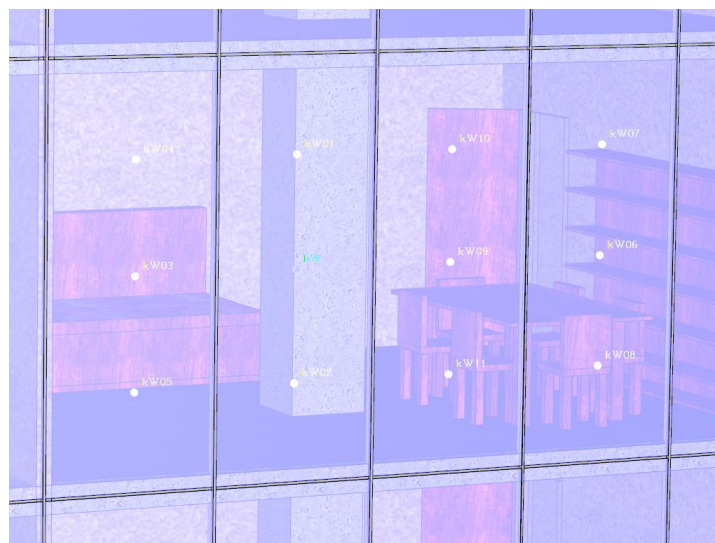


Рис. 7. Розміщення датчиків на задній від місця пожежі поверхні скла вікон.

За вихідними умовами пожежа виникає внаслідок необережного поводження під час куріння. Пожежне навантаження на поверхсі за аналітичними даними в середньому становить  $660 \text{ кВт/м}^2$  із максимальною температурою горіння  $1180 \text{ }^\circ\text{C}$ . Поширення полум'я по приміщенні відбувається із швидкістю  $0,027 \text{ м/с}$ . Під час проведення розрахунків не враховувалась робота систем протипожежного захисту, пожежа розвивалася вільно.

Відстань від зрошувачів, що розташовуються всередині по периметру зовнішніх огорожувальних світлопрозорих конструкцій фасаду, до цих конструкцій становить –  $0,5 \text{ м}$ , а відстань між зрошувачами –  $2 \text{ м}$  (рис. 8).





**Рис. 8.** Розміщення зрошувачів по периметру зовнішніх огорожувальних світлопрозорих конструкцій фасаду.

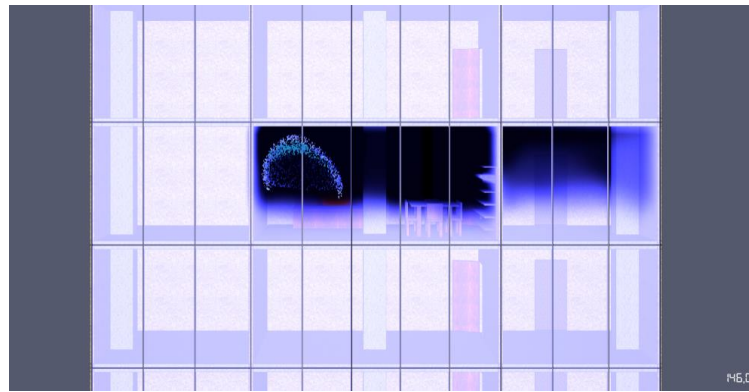
Параметри зрошувача (рис. 9):

- температура спрацювання – 74 °С;
- витрати води – 0,8 л/с;
- робочий тиск – 7 Па;
- к-фактор – 85;
- тип струминної течії – конічний.

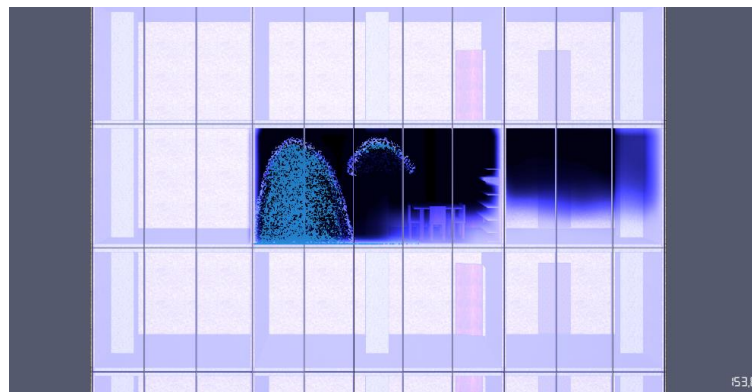


**Рис. 9.** Вигляд спринклера зрошувального.

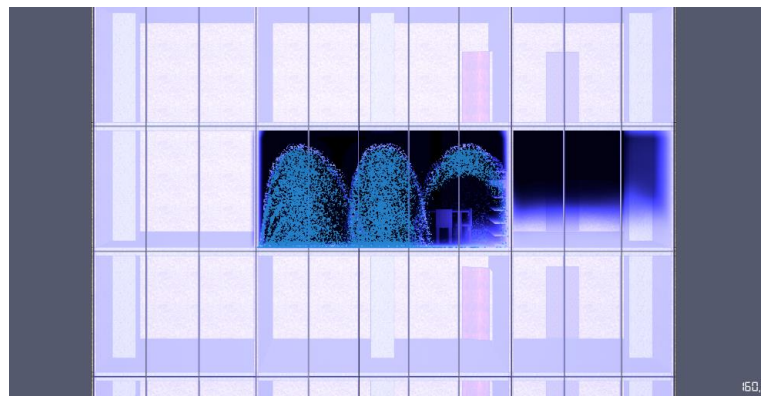
На 146 ( $\pm 1$ ) секунді від початку пожежі відбувається спрацювання першого, лівіше розташованого спринклера (рис. 10), на 133 ( $\pm 1$ ) секунді спрацьовує центральний (рис. 11) та на 134 ( $\pm 1$ ) секунді спрацьовує останній спринклер, який розташований праворуч (рис. 12).



**Рис. 10.** Графічне зображення спрацювання першого спринклера

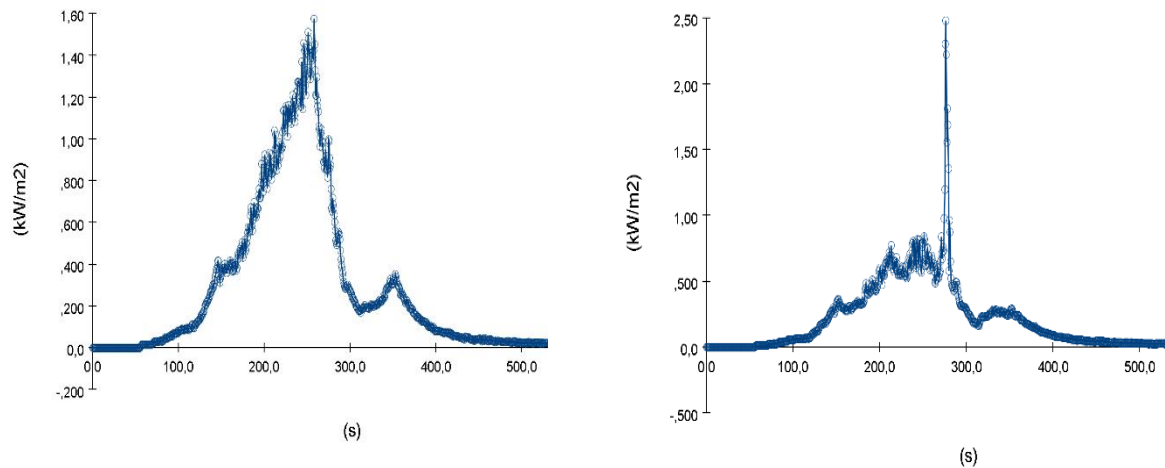


**Рис. 11.** Графічне зображення спрацювання другого спринклера



**Рис. 12.** Графічне зображення спрацювання третього спринклера

Максимальне значення падаючого теплового потоку на задній частині скла з необігрівній частині становила не більше  $2 \text{ кВт/м}^2$ , що в 20 разів менше критичного значення –  $40,3 \text{ кВт/м}^2$ , при якому опираючись на наукові дослідження не відбувається руйнування подвійного склопакета зі незагартованого скла товщиною 6 мм (рис. 13).



**Рис. 13.** Графік значень падаючого теплового потоку на задній частині скла з необігрівної частини у двох точках.

Зменшення значень теплового потоку в 20 разів від допустимих значень є результатом роботи спринклерних зрошувачів з витратою води 0,8 л/с.

В подальшому, не змінюючи умови, проведено моделювань для визначення мінімальних значень витрат води зі зрошувачів для забезпечення ефективного захисту.

Зменшуючи витрати від 0,8 л/с до 0,7 л/с, 0,6 л/с, та 0,5 л/с значення теплового потоку на задній частині скла з необігрівної частині підвищилася з 2 кВт/м<sup>2</sup> до 10,5 кВт/м<sup>2</sup>, 21,2 кВт/м<sup>2</sup>, 36,5 кВт/м<sup>2</sup> відповідно (табл. 1).

**Таблиця 1.**

Значення теплового потоку від пожежі на задній частині скла з необігрівної частині захищеного зрошувачами при різних витратах води з них

№ з/п	Витрати води зі зрошувача	Значення теплового потоку	Висновок
1	0,8 л/с	2 кВт/м <sup>2</sup>	задовольняє
2	0,7 л/с	10,5 кВт/м <sup>2</sup>	задовольняє
3	0,6 л/с	21,2 кВт/м <sup>2</sup>	задовольняє
4	0,5 л/с	36,5 кВт/м <sup>2</sup>	задовольняє

Провівши ряд чисельних розрахунків за допомогою PyroSim було визначено, що для ефективного захисту суцільного фасаду залізобетонних будівель, який виконано із подвійного склопакета зі незагартованими склом товщиною 6 мм розмірами 1,3 x 3 м, з розміщеному в ньому пожежним навантаженням 660 кВт/м<sup>2</sup> та максимальною температурою горіння 1180 °С, достатньо розмістити три зрошувачі.

Відстань від зрошувачів, що розташовуються всередині по периметру зовнішніх огорожувальних світлопрозорих конструкцій фасаду, до цих конструкцій повинна становити - 0,5 м, а відстань між зрошувачами - 2 м.

Так як під час розрахунків не було взято до уваги зміну температури навколишнього залежно від пори року, можливу зміну розташування пожежного навантаження, було умовно прийнято коефіцієнт безпеки - 1,3.

Мінімальні параметри зрошувача становили:

- температура спрацювання – 74 °С;
- витрати води – 0,6 л/с;
- робочий тиск – 7 Па;
- к-фактор – 85;
- тип струминної течії – конічний.

Зрошувачі можуть бути дуже ефективними для захисту світлопрозорих конструкцій фасаду висотних будівель.

Використання зрошувачів є важливим заходом забезпечення протипожежної безпеки. Зрошувачі можуть значно підвищити рівень захисту, запобігаючи поширенню вогню та зменшуючи шкоду від пожежі, а саме:

- сприяють охолодженню світлопрозорих конструкцій, знижуючи температуру скла і металевих профілів (це запобігає їхньому деформуванню і руйнуванню під впливом високих температур);
- зменшують теплове випромінювання;
- зменшують ризик утворення тріщин у склі через теплове навантаження, зберігаючи цілісність світлопрозорих елементів і запобігаючи їх руйнуванню;
- допомагають зменшити виділення диму та токсичних газів, що утворюються під час горіння, покращуючи умови для евакуації та роботи пожежно-рятувальних підрозділів;
- автоматичне спрацювання, забезпечує оперативність в ліквідації пожежі навіть за відсутності людей.

Зрошувачі можуть бути інтегровані з іншими протипожежними системами, такими як системи димовидалення і сигналізації, що забезпечує комплексний підхід до протипожежного захисту.

Однак, варто враховувати кілька викликів, з якими можуть зіткнутися системи зрошувачів у світлопрозорих конструкціях висотних будівель, а саме: висотні будівлі вимагають систем з високим тиском води, щоб забезпечити належне розпилювання на верхніх поверхах; постійний контакт з водою може викликати корозію металевих елементів, що вимагає використання спеціальних антикорозійних матеріалів.

## 5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Є необхідність встановлення зрошувачів, які можуть значно підвищити рівень безпеки. Зрошувачі забезпечують швидке охолодження конструкцій, запобігаючи їх руйнуванню та поширенню вогню. Слід зазначити, що водяне зрошення вимагає врахування великої кількості критеріїв, які впливають на ефективність захисту.

Вочевидь, доцільне застосування програмного комплексу PyroSim для визначення ефективності захисту зрошувачами світлопрозорих конструкцій фасаду висотних будівель полягає в проведенні детального моделювання та аналізу пожежних сценаріїв.

Використання PyroSim дозволяє здійснити комплексний аналіз ефективності захисту зрошувачами світлопрозорих конструкцій фасаду висотних будівель, забезпечуючи високий рівень протипожежної безпеки та захисту майна та життя людей.

Під час чисельного експерименту встановлено (табл. 1) величини значення теплового потоку від пожежі на задній частині скла з необігрівної частини захищеного зрошувачами при різних витратах води з них. Результати моделювання за допомогою програмного комплексу PyroSim показують правильне розташування та налаштування параметрів зрошувачів.

Використання зрошувачів є важливим заходом забезпечення протипожежної безпеки. Зрошувачі можуть значно підвищити рівень захисту, запобігаючи поширенню вогню та зменшуючи шкоду від пожежі.

Результати моделювання можуть бути використані для оптимізації проектування протипожежних систем.

## 6 ВИСНОВКИ

Світлопрозорі конструкції, такі як скляні фасади, забезпечують естетичний вигляд будівлі і максимальне використання природного освітлення, але вони також мають обмеження щодо вогнестійкості. В умовах пожежі такі конструкції можуть швидко нагріватися, що призводить до їхнього руйнування і сприяє поширенню вогню. Це створює додаткові ризики для безпеки мешканців і стійкості будівлі в цілому.

Системи водяного зрошування є ефективним методом гасіння пожежі та охолодження світлопрозорих фасадів. Результати моделювання за допомогою програмного комплексу PyroSim показують, що правильне розташування та налаштування параметрів зрошувачів можуть суттєво знизити ризик поширення вогню та зберегти конструктивну цілісність фасадів.

PyroSim є потужним інструментом для моделювання пожеж та впливу протипожежних систем на складних архітектурних об'єктах, зокрема висотних будівлях зі світлопрозорими фасадними конструкціями.

Результати моделювання можуть бути використані для оптимізації проектування протипожежних систем і забезпечення відповідності будівельних норм питанням пожежної безпеки. Це сприяє підвищенню рівня безпеки висотних будівель та мінімізації ризиків для життя і здоров'я людей.

## 7 ПОДЯКИ

Автори висловлюють щире подяку компанії Thunderhead Engineering (США) за підтримку цього дослідження.

## 8 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори статті не мають відповідних фінансових чи нефінансових інтересів, які слід розкривати.

## Література

1. Полупан В.А., Рашкевич Н.В. Актуальність удосконалення системи пожежної безпеки в висотних будівлях. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми пожежної безпеки 2022» («Fire Safety Issues 2022»). м. Харків: НУЦЗУ, 12.10.2022 р. С. 122–123.
2. Полупан В.А., Рашкевич Н.В. Важливість забезпечення пожежної безпеки висотних будівель. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Problems of Emergency Situations». Харків: НУЦЗ України, 2023 р. С. 112–113.
3. ДБН В.2.2-41:2019 «Висотні будівлі. Основні положення». [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=84353](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=84353)
4. Knaack, U., Klein, T., Bilow, M., & Auer, T. (2014). *Façades: principles of construction*. Birkhäuser.
5. Čolić, A., & Pečur, I. B. (2020). Influence of horizontal and vertical barriers on fire development for ventilated façades. *Fire technology*, 56(4). 1725–1754.
6. Nguyen, Q., Ngo, T., Mendis, P., & Tran, P. (2013). Composite materials for next generation building facade systems. *Civil Engineering and Architecture*, 1(3). 88–95.
7. Anderson, J., Boström, L., Chiva, R., Guillaume, E., Colwell, S., Hofmann, A., & Tóth, P. (2021). European approach to assess the fire performance of façades. *Fire and materials*, 45(5). 598–608.
8. Отрош Ю.А., Ковальов А.І., Пурденко Р.Р., Рашкевич Н.В., Майборода Р.І. Дослідження вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій для підвищення рівня пожежної безпеки. *Проблеми надзвичайних ситуацій*, № 2(36). 2022. С. 102–122.

9. Степанко А.С., Отрош Ю.А., Кукузенко А.М., Рашкевич О.С., Рашкевич Н.В., Augusto Gerolin Пожежна небезпека теплоізоляційних вогнезахисних матеріалів: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми пожежної безпеки 2022» («Fire Safety Issues 2022»). м. Харків: НУЦЗУ, 12.10.2022 р. С. 130–132.
10. Gravit, M., Klimin, N., Karimova, A., Fedotova, E., & Dmitriev, I. (2021, April). Fire resistance evaluation of tempered glass in software ELCUT. In Proceedings of International Scientific Conference on Telecommunications, Computing and Control: TELECCON 2019 (pp. 523-537). Singapore: Springer Singapore.
11. Гетун Г.В., Чухрай С.М. Новітні енергоефективні огорожувальні конструкції. Енергоефективність в будівництві та архітектурі, 4. 2013. С. 57–62.
12. Яковчук Р.С., Кагітін О.І. Заходи підвищення пожежної безпеки конструкцій фасадної теплоізоляції з вентиляльованим повітряним прошарком. 2022.
13. Yokoi, S. (1960). Study on the prevention of fire spread caused by hot upper current. Tokyo: Building Research Institute.
14. Longhua, Hu, Kaihua, Lu, Delichatsios, M., Linghui, He, & Fei, Tang. (2012). An experimental investigation and statistical characterization of intermittent flame ejecting behavior of enclosure fires with an opening. Combustion and Flame, 159(3). 1178–1184.
15. Oleszkiewicz, I. (1991). Vertical separation of windows using spandrel walls and horizontal projections. Fire Technology, 27 (4). 334–340.
16. Giraldo, M. Pilar, Avellaneda, J., Lacasta Ana M., & Rodriguez, V. (2012). Computer-simulation research on building-facade geometry for fire spread control in buildings with wood claddings. World Conference on Timber Engineering. Engineering technical, 17(1).
17. Kim, A.K., & Loughheed G.D. (1997). Fire protection of windows using sprinklers. Construction Technology Updates. Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, December.

## References

1. Polupan, V.A., Rashkevych, N.V. Aktual'nist' udoskonalennya systemy pozhezhnoyi bezpeky u vysotnykh budivlyakh. Materialy Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Problemy pozhezhnoyi bezpeky 2022». Kharkiv: NUTSZU, 12.10.2022. 122–123.
2. Polupan, V.A., Rashkevych, N.V. Vazhlyvist' zabezpechennya pozhezhnoyi bezpeky vysotnykh budivel'. Materialy Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy». Kharkiv: NUTSZU Ukrainy, 2023. 112–113.
3. DBN V.2.2-41:2019 «Vysotni budivli. Osnovni polozhennya». [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=84353](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=84353)
4. Knaack, U., Klein, T., Bilow, M., & Auer, T. (2014). Façades: principles of construction. Birkhäuser.
5. Čolić, A., & Pečur, I. B. (2020). Influence of horizontal and vertical barriers on fire development for ventilated façades. Fire technology, 56(4). 1725–1754.
6. Nguyen, Q., Ngo, T., Mendis, P., & Tran, P. (2013). Composite materials for next generation building facade systems. Civil Engineering and Architecture, 1(3). 88–95.
7. Anderson, J., Boström, L., Chiva, R., Guillaume, E., Colwell, S., Hofmann, A., & Tóth, P. (2021). European approach to assess the fire performance of façades. Fire and materials, 45(5). 598–608.
8. Otrosh, Yu.A., Koval'ov, A.I., Purdenko, R.R., Rashkevych, N.V., Mayboroda, R.I. (2022). Do8. slidzhennya vohnestiykosti vohnezakhyschenykh zalizobetonnykh konstruktsiy dlya pidvyshchennya rivnya pozhezhnoyi bezpeky. Problemy nadzvychaynykh situatsiy, 2(36). 102–122.
9. Stepanko, A.S., Otrosh, Yu.A., Kukuzenko, A.M., Rashkevych, O.S., Rashkevych, N.V., Auhusto Herolin Pozhezhna nebezpeka teploizolyatsiynykh vohnezakhysnykh materialiv: materialy Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Problemy pozhezhnoyi bezpeky». 2022» («Problemy pozhezhnoyi bezpeky 2022»). Kharkiv: NUTSZU, 12.10.2022 r. 130–132.
10. Gravit, M., Klimin, N., Karimova, A., Fedotova, E., & Dmitriev, I. (2021, April). Fire resistance evaluation of tempered glass in software ELCUT. In Proceedings of International Scientific Conference on Telecommunications, Computing and Control: TELECCON 2019 (pp. 523-537). Singapore: Springer Singapore.

11. Hetun, H.V., & Chukhray, S.M. (2013). Novitni enerhoefektyvni ohorodzhuval'ni konstruktsiyi. Enerhoefektyvnist' u budivnytstvi ta arkhitekturi, 4. 57–62.
12. Yakovchuk, R.S., & Kahitin, O.I. (2022). Zakhody pidvyshchennya pozhezhnoyi bezpeky konstruktsiyi fasadnoyi teploizolyatsiyi z ventilyatsiynym povitryanym prosharkom.
13. Yokoi, S. (1960). Study on the prevention of fire spread caused by hot upper current. Tokyo: Building Research Institute.
14. Longhua, Hu, Kaihua, Lu, Delichatsios, M., Linghui, He, & Fei, Tang. (2012). An experimental investigation and statistical characterization of intermittent flame ejecting behavior of enclosure fires with an opening. Combustion and Flame, 159(3). 1178–1184.
15. Oleszkiewicz, I. (1991). Vertical separation of windows using spandrel walls and horizontal projections. Fire Technology, 27 (4). 334–340.
16. Giraldo, M. Pilar, Avellaneda, J., Lacasta Ana M., & Rodriguez, V. (2012). Computer-simulation research on building-facade geometry for fire spread control in buildings with wood claddings. World Conference on Timber Engineering. Engineering technical, 17(1).
17. Kim, A.K., & Loughheed G.D. (1997). Fire protection of windows using sprinklers. Construction Technology Updates. Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, December.

**Майборода Роман Ігорович**

Національний університет цивільного захисту України  
викладач кафедри  
вул. Чернишевська, 94, Харків, Україна, 61023  
maiboroda.roman@ukr.net  
ORCID: 0000-0002-3461-2959

**Рашкевич Ніна Владиславівна**

Національний університет цивільного захисту України  
доктор філософії, доцент кафедри  
вул. Чернишевська, 94, Харків, Україна, 61023  
nine291085@gmail.com  
ORCID: 0000-0001-5124-6068

**Отрош Юрій Анатолійович**

Національний університет цивільного захисту України  
д.т.н., професор  
вул. Чернишевська, 94, Харків, Україна, 61023  
yuriyotrosh@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-0698-2888

**Балдук Павло Георгійович**

Одеська державна академія будівництва та архітектури  
к.т.н., професор кафедри  
вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029  
baldook.p@odaba.edu.ua  
ORCID: 0000-0002-9055-9005

*Для посилань:*

Майборода Р. І., Рашкевич Н. В., Отрош Ю. А., Балдук П. Г. Моделювання вогнезахисту світлопрозорих фасадних конструкцій з влаштуванням зрошувачів. Механіка та математичні методи, 2024.Т. VI. № 2. с. 160–174

*For references:*

R. Maiboroda, N. Rashkevich, Yu. Otrosh, P. Balduk. (2024). Modeling of fire protection of transparent facade structures with sprinklers. Mechanics and mathematical methods. VI (2). 160–174.