

Р.І. Майборода¹, Н.В. Рашкевич¹, Ю.А. Отрош¹, Д.О. Кіріченко²

¹Національний університет цивільного захисту України, Україна

²Одеська державна академія будівництва та архітектури, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ СВІТЛОПРОЗОРИХ ФАСАДНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ВПЛИВІ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

У ході досліджень за допомогою програмного комплексу PyroSim проведено моделювання поведінки світлопрозорих фасадних конструкцій при впливі високих температур. Подвійний склопакет із незагартованого скла товщиною 6 мм руйнується під час пожежі на 260(±10) секунді до прибуття пожежо-рятувальних підрозділів та існує велика ймовірність до розповсюдження пожежі через скління на вище розташовані поверхи.

Ключові слова: скло, руйнування, пожежа, теплові потоки, PyroSim.

Постановка проблеми

У сучасному будівництві висотних будівель застосування світлопрозорих фасадних конструкцій є надзвичайно популярним рішенням завдяки їх естетичним та енергоефективним властивостям. Яскравими прикладами світлопрозорих фасадів будівель в Україні є багатофункціональний комплекс «Гулівер» (висота 148 метрів, 35 поверхів), будівля Міністерства інфраструктури України (висота 120 метрів, 28 поверхів), Бізнес-центр «101 Tower» (висота 116 метрів, 27 поверхів), тощо. Кількість подібних будівель з кожним роком неухильно зростає.

Однак, виникає серйозний виклик щодо забезпечення пожежної безпеки таких конструкцій, оскільки скління має обмежену вогнестійкість [1, 2]. Під впливом високих температур під час пожежі світлопрозорі елементи, зокрема подвійні склопакети зі незагартованого скла, можуть руйнуватися впродовж короткого часу, що створює загрозу швидкого поширення вогню на інші поверхи. Неповнота даних про поведінку скла при зовнішньому впливі пожежі перешкоджає адекватній оцінці ризиків та розробці ефективних заходів пожежної безпеки будівель зі скляними фасадами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вивчення поведінки скла в умовах пожежі є комплексним і багатогранним напрямом досліджень, який охоплює аналіз температурних впливів, механічних навантажень, типів скла і ефективності систем протипожежного захисту. Результати досліджень спрямовані на забезпечення високого рівня безпеки у сучасному висотному будівництві, де світлопрозорі фасади стають все більш популярними.

Дослідження поведінки скла в умовах пожежі включають вивчення температурного впливу на

скляні елементи [3, 4]. Скло, як матеріал, має високий коефіцієнт теплового розширення, і при нагріванні його поверхня може зазнавати значних внутрішніх напружень. Ці напруження можуть призводити до утворення тріщин і руйнування скла. Вчені досліджують критичні температури, при яких скло починає втрачати свою цілісність, а також механізми розтріскування під впливом різних температурних градієнтів. Головним критерієм, що сприяє руйнуванню скла, є швидкість наростання температурного на ньому.

Значна увага приділяється впливу типу і складу скла на його поведінку під час пожежі. Існують різні види скла, такі як загартоване, ламіноване та багатошарове скло, кожне з яких має свої характеристики щодо вогнестійкості. Загартоване скло, наприклад, відрізняється підвищеною міцністю і стійкістю до високих температур, але може раптово руйнуватися при досягненні критичної температури [5]. Ламіноване скло має міжшарову плівку, яка допомагає утримувати уламки скла разом, зменшуючи ризик травмування людей [6].

Вогнестійкість світлопрозорої конструкції залежить не тільки від вогнестійкості склопакета, однаково вона залежить від елементів несучих конструкцій та їх здатності чинити опір пожежі [7]. Стандартні алюмінієві профільні системи, які застосовуються в конструкціях, що захищають будівель, мають межу вогнестійкості R5-R10. Застосовувані у складі конструкцій сплави алюмінію втрачають міцність при нагріванні до температури 200–250°C, а при температурі від 575 до 660°C переходять у розплавлений стан.

Дослідження вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій [8, 9] є важливим кроком до підвищення пожежної безпеки висотних будівель

з світлопрозорими конструкціями, забезпечуючи обмеження поширення вогню.

Дослідники вивчають вплив механічних навантажень і зовнішніх факторів, таких як вітер та удари, на поведінку скла під час пожежі [10, 11]. Поєднання високих температур і механічних навантажень може прискорити процес руйнування скла. Такі дослідження дозволяють визначити умови, за яких скло залишається стабільним і безпечним, а також розробити рекомендації для проектування і монтажу скляних фасадів.

Автори [12–14] проводять аналіз впливу різних систем протипожежного захисту на зменшення ризику руйнування скла. Системи автоматичного пожежогасіння можуть знизити температуру навколо світлопрозорих конструкцій, уповільнюючи процес їхнього нагрівання і руйнування. Термоізоляція може захистити скляні фасади від безпосереднього впливу полум'я.

У роботі [15] представлені наочні результати комп'ютерного моделювання, що характеризують позитивний вплив наявності козирків на обмеження впливу полум'я на фасад будівлі.

Дослідниками [16] встановлено, що на ймовірність виходу полум'я на фасад будівлі впливає потужність вогнища пожежі, а розмір полум'я, що впливає на фасад, залежить від розмірів віконного отвору (співвідношення висоти та довжини вікна). Відповідно, для запобігання переходу полум'я між суміжними поверхнями необхідно регламентувати розміри віконних отворів.

Вивченню підлягають випадки пожеж у будівлях зі світлопрозорими фасадами для оцінки ефективності існуючих нормативних вимог і виявлення можливих недоліків у захисних системах [12, 13]. Такий аналіз допомагає удосконалити вимоги пожежної безпеки та розробляти нові, більш ефективні методи вогнезахисту [17, 18].

На реальних пожежах під час руйнування світлопрозорого заповнення та виходу полум'я пожежі на фасад будівлі реалізується максимально швидкий приріст температури вздовж площини фасаду. На сьогоднішній день відсутні відомості про поведінку скла при зовнішньому впливі пожежі, а також відсутня будь-яка методика, що дозволяє спрогнозувати загрозу руйнування світлопрозорого заповнення вище поверху та розповсюдження пожежі по будівлі.

Мета та завдання статті

Мета роботи – дослідити стійкість світлопрозорих конструкцій висотних будівель під впливом високих температур.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні наукові завдання:

- проаналізувати механізм руйнування скла під впливом високих температур;
- проаналізувати механізм поширення пожежі через віконні прорізи по фасаду висотної будівлі;
- розробити модель руйнування світлопрозорих конструкцій висотних будівель при пожежі.

Виклад основного матеріалу

Як правило, світлопрозорий фасад будівлі одночасно виконує функції огорожуючих зовнішніх стін, що забезпечують теплоізоляцію будівлі, і створює зовнішній вигляд будівлі, що формує архітектуру міста. Фасад сприймає вплив зовнішніх факторів (дощ, вітер, температурний вплив навколишнього середовища), а також у разі виникнення внутрішньої пожежі повинен забезпечити його нерозповсюдження із зовнішньої сторони будівлі.

Під час пожежі світлопрозорі конструкції зазнають впливу високих температур. Спочатку, при нагріванні до високих температур, відбувається розширення матеріалу конструкцій (скла), що супроводжується внутрішніми напруженнями. Оскільки скло є аморфним матеріалом, воно не має чітко визначеної температури плавлення, а натомість м'якшає. Це призводить до виникнення термічних напружень через нерівномірний розподіл температури по товщині скла, особливо якщо одна сторона нагрівається значно швидше, ніж інша.

Коли температура перевищує критичну точку для певного виду скла, починається процес утворення мікротріщин. Ці тріщини утворюються внаслідок концентрації напружень у найслабших точках матеріалу, часто біля поверхневих дефектів або нерівностей. З подальшим зростанням температури та розширенням мікротріщини об'єднуються і поширюються, утворюючи великі тріщини, що значно послаблює структуру скла.

У той же час, якщо скло піддається різкому охолодженню після нагріву (наприклад, під час пожежогасіння), виникають додаткові напруження через швидке зменшення об'єму матеріалу. Це явище відоме як термічний удар, який може прискорити процес руйнування. Скло, яке вже має мікротріщини, піддається сильному впливу термічного удару, що сприяє швидкому поширенню тріщин і, як наслідок, руйнуванню скла.

Важливим фактором, що впливає на руйнування скла, є наявність у його складі домішок і неоднорідностей, які можуть сприяти виникненню додаткових напружень. Також слід зазначити, що хімічна стабільність скла може бути порушена при високих температурах, що призводить до зміни його властивостей та подальшого руйнування.

Таким чином, механізм руйнування скла під впливом високих температур включає теплове розширення, утворення і поширення мікротріщин, термічний удар при різкому охолодженні, а також вплив домішок і неоднорідностей у матеріалі. Ці фактори разом призводять до втрати цілісності скла і його руйнування.

Через зруйноване скло полум'я і гаряче повітря виходять назовні, починаючи взаємодіяти з фасадом будівлі. Залежно від матеріалів, використовуваних у фасадній конструкції, пожежа може швидко поширюватися по зовнішній поверхні будівлі.

Гаряче повітря і полум'я піднімаються вгору, впливаючи на віконні конструкції верхніх поверхів. Висока температура може призвести до руйнування скла на вищих поверхах, відкриваючи шлях для подальшого поширення пожежі. Вертикальний простір між фасадними панелями і стіною будівлі може створити ефект димоходу, сприяючи швидкому підніманню вогню і диму вгору. Сильний вітер може сприяти швидкому поширенню пожежі, переносячи полум'я на більші відстані по фасаді і на сусідні будівлі.

У ході детального аналізу динаміки пожежі та її впливу на будівельні конструкції використаний програмний комплекс PyroSim.

Основними етапами проведення моделювання руйнування світлопрозорих конструкцій було:

1. Підготовка моделі будівлі:
 - створення 3D-моделі висотної будівлі з усіма необхідними конструкційними деталями, включаючи світлопрозорі елементи;
 - визначення матеріальних властивостей скла та рамкових елементів (температурна стійкість, коефіцієнт теплового розширення).
2. Налаштування сценаріїв пожежі:
 - визначення початкової точки загоряння та умов для розвитку пожежі;
 - моделювання різних сценаріїв пожежі, включаючи внутрішні та зовнішні впливи.
3. Симуляція теплових процесів:
 - аналіз розподілу температур по будівлі та впливу на світлопрозорі конструкції;
 - визначення критичних температур, при яких починається руйнування скла та інших світлопрозорих матеріалів.
4. Аналіз структурної цілісності:
 - оцінка впливу термічних напружень на світлопрозорі конструкції;
 - моделювання процесу утворення мікротріщин і їх поширення при нагріванні.
5. Розрахунок поширення пожежі:

– оцінка того, як руйнування світлопрозорих елементів впливає на подальше поширення вогню по фасаді та всередині будівлі;

– визначення зон найбільшого ризику для швидкого поширення пожежі;

При проведенні розрахунків необхідно обов'язково враховувати:

1. Геометричні розміри приміщення, наявність відкритих отворів.
2. Розрахунковий сценарій виникнення пожежі.
2. Наявність, кількість, розміри віконних отворів, параметри скління.
3. Характеристики пожежного навантаження, місця його розміщення.
4. Час вільного розвитку пожежі.
5. Системи протипожежного захисту.
6. Нахил фасаду будівлі відносно землі.
6. Теплофізичні характеристики огорожуючих конструкцій будівлі.
7. Температура навколишнього середовища.

Модель будівлі, що розглядається в роботі, представляє собою 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.

Основні конструктивні елементи будинку виконано з монолітного бетону типу «бетон важкий» густиною 2280 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 вітру не враховувалось.

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

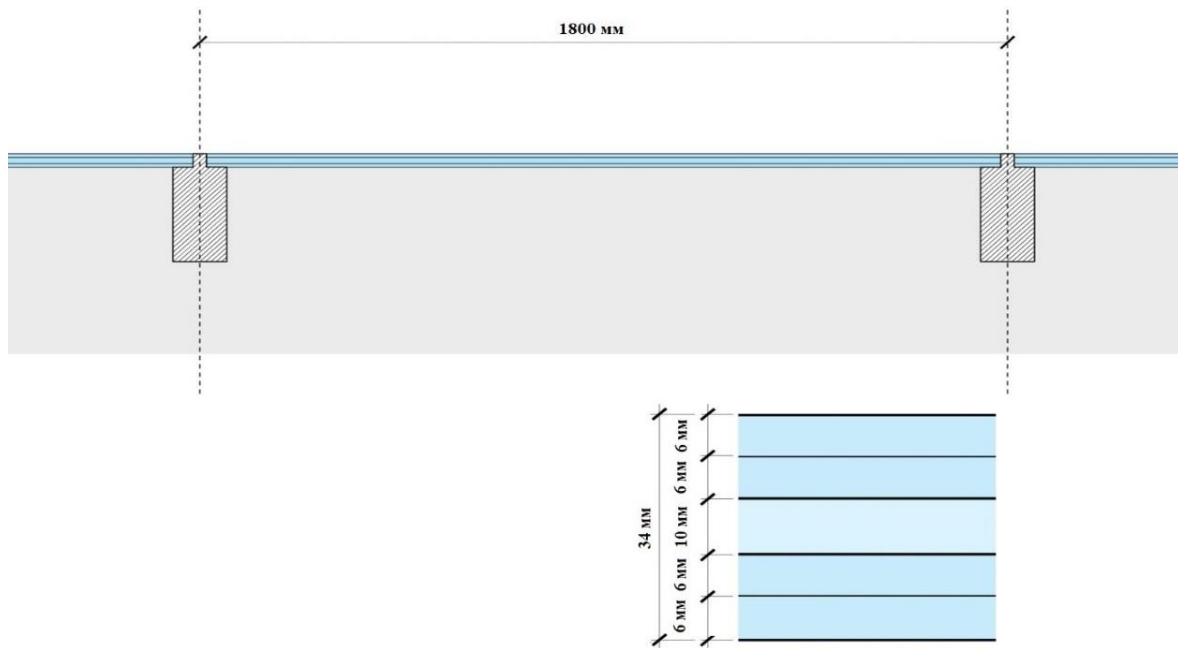


Рис. 1. Схематичне зображення подвійного двокамерного склопакету.

Для можливості визначення значень теплового потоку, що надходить від пожежі, розміщено 15 датчиків на задній від місця пожежі поверхні скла вікон (рис. 2).

За вихідними умовами пожежа виникає внаслідок необережного поводження під час куріння. Пожежне навантаження на поверхсі за аналітичними даними в середньому становить 660 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.

Загальний час розрахунку приймається 10 хвилин (600 секунд) так як відповідно до вимог ДБН В.2.2-41:2019 «Висотні будівлі. Основні положення» пожежно-рятувальні підрозділи повинні бути розташовані на відстані не більше ніж 2 км або загальний час прибуття не повинен перевищувати 5 хвилин (300 секунд), а також додатковий часу на оперативне розгортання сил та засобів пожежно-

рятувальних підрозділів для ліквідації пожежі – приймається 5 хвилин (300 секунд).

На рис. 2 також представлено фрагмент змодельованої будівлі з розміщеному на поверхсі пожежного навантаження яке представлено у вигляді дивану, килима, шафи, міжкімнатних дверей, столу зі стільцями, параметри горіння яких визначалися у відповідності до довідникових даних.

З метою визначення температурних значень на поверхні склопакетів розміщених на верхніх поверххах встановлено додатково термомпари.

На $260(\pm 10)$ секунд від початку пожежі відбувається руйнування першого склопакету, значення падаючого теплового потоку на задній частині скла з необігрівної частині становить більше $40,3 \text{ кВт/м}^2$ (рис. 3, 4).

Додатковий приток повітря, який надходить через зруйноване скління, сприяє розвідці. Це призводить до швидкого руйнування інших склопакетів на 302, 307, 310, 312 секундах відповідно (рис. 5, 6).

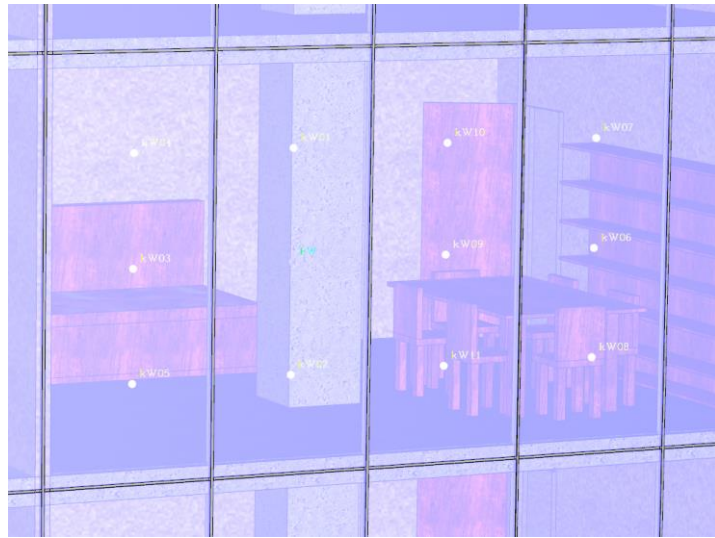


Рис. 2. Розміщення датчиків на задній від місця пожежі поверхні скла вікон, пожежного навантаження.

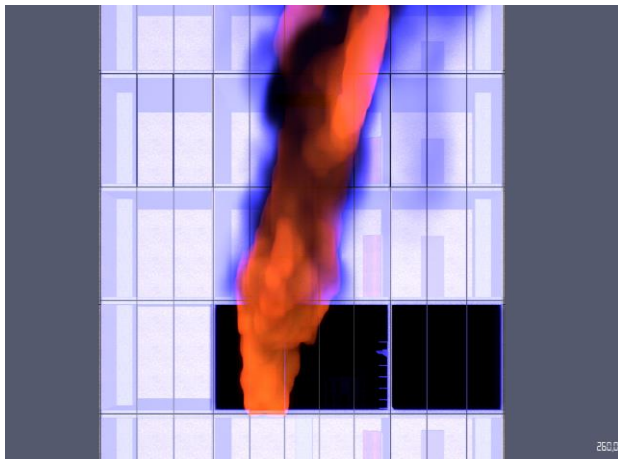


Рис. 3. Графічне зображення руйнування першого вікна.

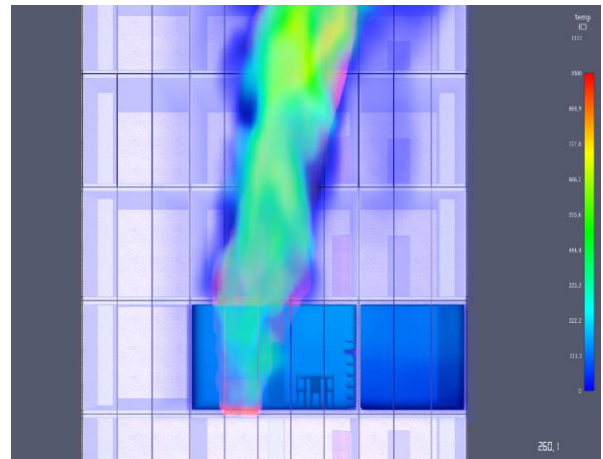


Рис. 4. Графічне зображення теплових потоків при руйнуванні першого вікна.

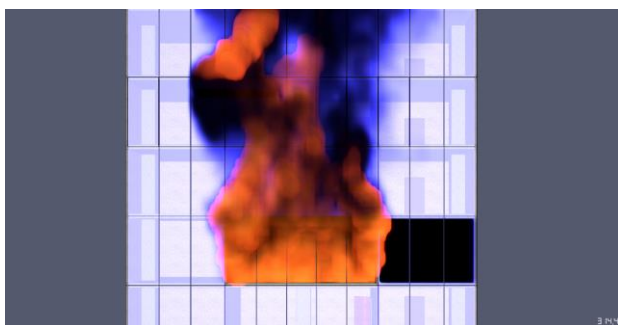


Рис. 5. Графічне зображення руйнування всіх вікон кімнати де виникла пожежа.

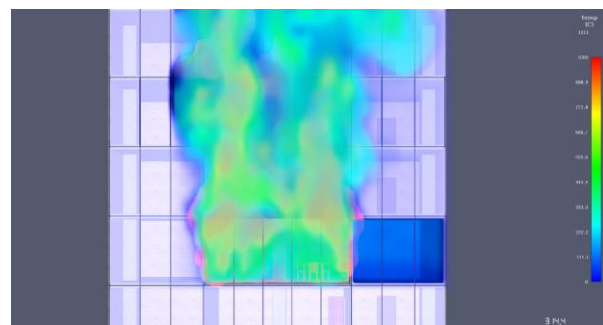


Рис. 6. Графічне зображення теплових потоків при руйнуванні всіх вікон кімнати де виникла пожежа.

Після руйнування склопакетів відбувається теплова конвекція – нагрів скління верхнього поверху, що розташований над місцем пожежі (рис. 7).

Максимальна температура яка фіксується за допомогою термопар в середньому становить 300–

330 °С, що є досить наближеною до температурних значень 350 °С при якому існує велика ймовірність руйнування подвійного склопакета зі незагартованого скла товщиною 6 мм (рис. 8).

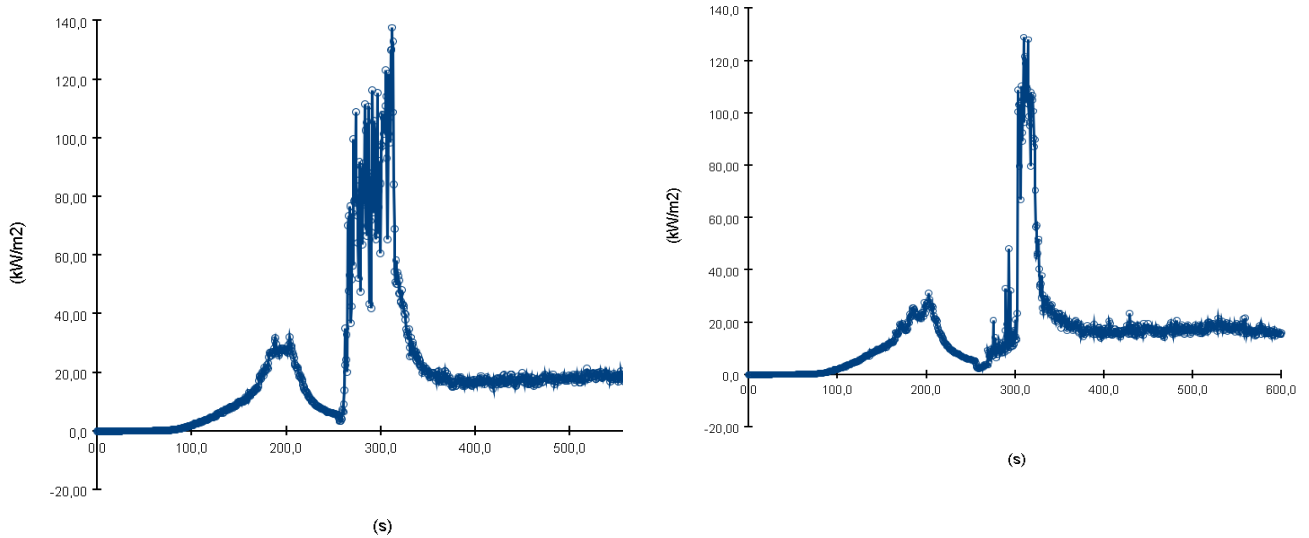


Рис. 7. Значення падаючого теплового потоку на задній частині скла з необігрівної частини в двох центральних точках.

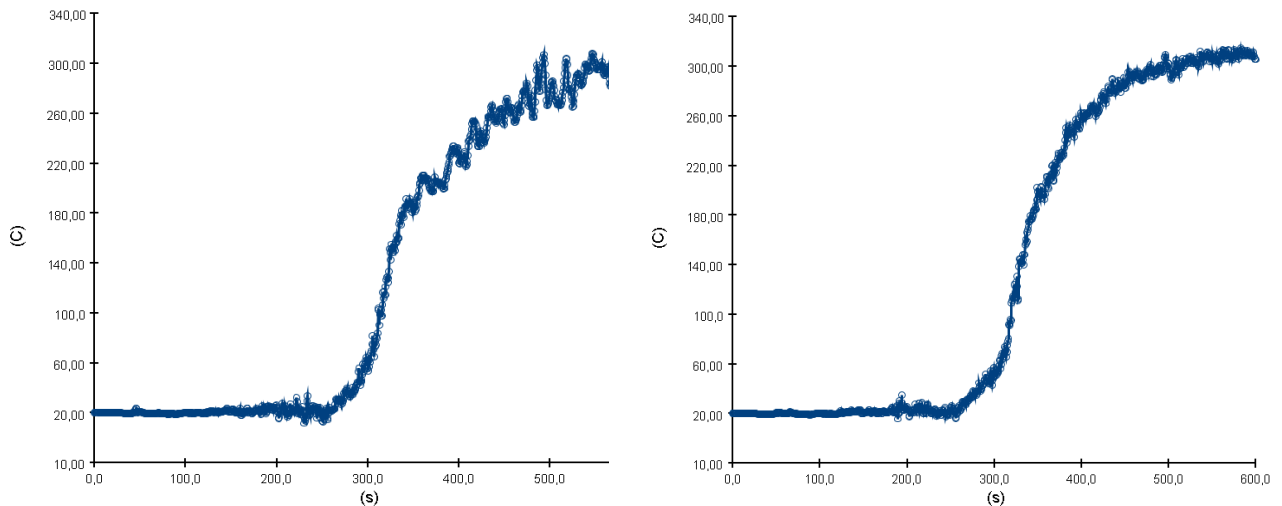


Рис. 8. Результати значень термодатчиків встановлених на поверхні склопакетів верхнього розташованого над місцем пожежі поверху в двох центральних точках.

За результатами моделювання ймовірної пожежі слід зазначити, що подвійний склопакет зі незагартованого скла товщиною 6 мм, який використовується в світлопрозорих конструкціях фасаду висотних будівель, руйнується пожежею на 260(±10) секунди до прибуття пожежно-рятувальних підрозділів та існує велика ймовірність до розповсюдження пожежі через скління на вище розташовані поверхи.

Висновки

1. Руйнування світлопрозорих фасадних конструкцій під час пожежі є наслідком комбінування термічного розширення, утворення і поширення мікротріщин, впливу термічного удару при різкому охолодженні та зміни властивостей

матеріалу під впливом високих температур. Ці фактори разом призводять до втрати структурної цілісності скла і його руйнування.

2. Поширення пожежі через віконні прорізи по фасаду висотної будівлі є складним процесом, який залежить від багатьох факторів, включаючи конструкцію будівлі, матеріали, використовувані у віконних системах, і зовнішні умови.

3. Використовуючи інструмент PyroSim проведено ряд чисельних розрахунків. За результатами моделювання ймовірної пожежі слід зазначити, що подвійний склопакет зі незагартованого скла товщиною 6 мм, який переважно використовується в світлопрозорих конструкціях фасаду висотних будівель, руйнується

пожежею на 260(±10) секунд до прибуття пожежно-рятувальних підрозділів.

Після руйнування склопакетів відбувається теплова конвекція нагрітих продуктів горіння та полум'я вертикально верх та високій температурі піддається скління верхнього розташованого над місцем пожежі поверху. Максимальна температура, яка фіксується за допомогою термопар, в середньому становить 300–330 °С, що є досить наближеною до температурних значень 350 °С при якому існує велика ймовірність руйнування подвійного склопакета зі незагартованого скла товщиною 6 мм. Як наслідок, існує велика ймовірність до розповсюдження пожежі через скління на вище розташовані поверхи.

Література

1. Полупан, В.А., Рашкевич, Н.В. Актуальність удосконалення системи пожежної безпеки в висотних будівлях [Текст] / В.А. Полупан, Н.В. Рашкевич // *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми пожежної безпеки 2022» («Fire Safety Issues 2022»)*. – Харків: НУЦЗУ, 2022. – С. 122–123.
2. Полупан, В.А., Рашкевич, Н.В. Важливість забезпечення пожежної безпеки висотних будівель [Текст] / В.А. Полупан, Н.В. Рашкевич // *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Problems of Emergency Situations»*. – Харків: НУЦЗУ, 2023. – С. 112–113.
3. Zhao, J., Liu, Q., Huang, H., Yang, R., Zhang, H. (2017). Experiments investigating fuel spread behaviors for continuous spill fires on fireproof glass. *Journal of Fire Sciences*, 35(1), 80–95.
4. Chow, W.K., Gao, Y. (2008). Thermal stresses on window glasses upon heating. *Construction and building materials*, 22(11), 2157–2164.
5. Wang, Y., Sun, J., He, L., Wang, Q., Rush, D. (2019). Experimental study on fallout behaviour of tempered glass façades with different frame insulation conditions in an enclosure fire. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37(3), 3889–3898.
6. Sabsabi, A., Youssef, M. A., El-Fitany, S. F., Vedrtmam, A. (2024). Simplified structural analysis of laminated glass panels during fire exposure. *Fire Safety Journal*, 146, 104158.
7. Аналіз чинників, які впливають на поширення вогню конструкцією фасадної теплоізоляції з вентильованим повітряним прошарком [Текст] / Р.С. Яковчук, О.І. Казітін, В.Б. Лоїк, О.Д. Синельников, Р.Р. Галанченко, О.О. Возняк // *Вісник ЛДУБЖД*. – №24. – 2021. – С. 57–65. DOI: 10.32447/20784643.24.2021.07
8. Отрош, Ю.А. Дослідження вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій для підвищення рівня пожежної безпеки [Текст] / Ю.А. Отрош, А.І. Ковальов, Р.Р. Пурденко, Н.В. Рашкевич, Р.І. Майборода // *Проблеми надзвичайних ситуацій*. – № 2(36). – 2022. – С. 102–122.
9. Пожежна небезпека теплоізоляційних вогнезахисних матеріалів [Текст] / А.С. Степанко, Ю.А. Отрош, А.М. Кукузенко, О.С. Рашкевич, Н.В. Рашкевич, А. Gerolin // *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми пожежної безпеки–2022»*. – Харків: НУЦЗУ, 2022. – С. 130–132.
10. Wang, Y., Xie, Q., Zhang, Y., Wang, Q., Sun, J. (2018). Sensitivity analysis of influencing factors on glass façade breakage in fire. *Fire safety journal*, 98, 38–47.
11. Chen, H., Zhao, H., Wang, Y., Wang, Q., Sun, J. (2017). The breakage of float glass with four-edge shading under the combined effect of wind loading and thermal loading. *Fire technology*, 53, 1233–1248.
12. Балло, Я.В. Аналіз та систематизація типів фасадних систем будівель як передумова удосконалення протипожежних заходів [Текст] / Я.В. Балло, Р.С. Яковчук, В.В. Ніжник, О.І. Казітін // *Пожежна безпека*. – №40. – 2022. – С. 5–15. DOI: 10.32447/20786662.40.2022.01
13. Bonomo, P., Frontini, F., Saretta, E. (2018) Fire safety of BIPV facades. Guideline for the implementation of the existing normative framework. Francesco Frontini SUPSI- Swiss BIPV Competence Centre https://repository.supsi.ch/12676/1/Active_Interfaces_HSLU_SUPSI_Fire_Safety%20%281%29.pdf
14. Bedon, C. (2017). Structural glass systems under fire: overview of design issues, experimental research, and developments. *Advances in Civil Engineering*, 2017(1), 2120570.
15. 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).
16. 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.
17. Вогнестійкість будівельних конструкцій як елемент системи пожежної безпеки [Текст] / В.А. Полупан, Н.В. Рашкевич, Р.І. Майборода, Ю.А. Отрош, Е.Е. Щолоков // *The 1 International Scientific and Practical Conference «Current trends in the development of modern scientific thought»*. Haifa, Israel, 2022. – С. 495–497.
18. Полупан, В.А. Критерії вибору способу вогнезахисту будівельних конструкцій [Текст] / В.А. Полупан, Р.І. Майборода, Ю.А. Отрош, Н.В. Рашкевич // *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення»*. – Львів, ЛДУ БЖД, 2022. – С. 77–79.

References

1. Polupan, V.A., Rashkevych, N.V. (2022). Aktual'nist' udoskonalennya systemy pozhezhnoyi bezpeky u vysotnykh budivlyakh. *Materialy Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Problemy pozhezhnoyi bezpeky 2022»*. Kharkiv: NUTSZU, 122–123.
2. Polupan, V.A., Rashkevych, N.V. (2023). Vazhlyvist' zabezpechennya pozhezhnoyi bezpeky vysotnykh budivel'. *Materialy Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy»*. Kharkiv: NUTSZ Ukrainy, 112–113.
3. Zhao, J., Liu, Q., Huang, H., Yang, R., Zhang, H. (2017). Experiments investigating fuel spread behaviors for continuous spill fires on fireproof glass. *Journal of Fire Sciences*, 35(1), 80–95.
4. Chow, W.K., Gao, Y. (2008). Thermal stresses on window glasses upon heating. *Construction and building materials*, 22(11), 2157–2164.
5. Wang, Y., Sun, J., He, L., Wang, Q., Rush, D. (2019). Experimental study on fallout behaviour of tempered glass façades with different frame insulation conditions in an enclosure fire. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37(3), 3889–3898.

6. Sabsabi, A., Youssef, M. A., El-Fitany, S. F., Vedrtam, A. (2024). Simplified structural analysis of laminated glass panels during fire exposure. *Fire Safety Journal*, 146, 104158.
7. Yakovchuk, R.S., Kahitin, O.I., Loyik, V.B., Synel'nikov, O.D., Halanchenko, R.R. Voznyak O.O. (2021). Analiz chynnykiv, yaki vplyvayut' na poshyrennya vohnyu konstruktivnoy fasadnoy teploizolyatsiyi z ventyl'ovanyym povitryanym prosharkom. *Visnyk LDUBZHD*, 24, 57–65. DOI: 10.32447/20784643.24.2021.07
8. Otrosh, Yu.A., Koval'ov, A.I., Purdenko, R.R., Rashkevych, N.V., Maiboroda, R.I. (2022). Doslidzhennya vohnestykyosti vohnezakhyschenykh zalizobetonnykh konstruktiv dlya pidvyshchennya rivnya pozhezhnoy bezpeky. *Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy*, 2(36), 102–122.
9. Stepanko, A.S., Otrosh, Yu.A., Kukuzenko, A.M., Rashkevych, O.S., Rashkevych, N.V., Gerolin, A. (2022). Pozhezhna nebezpeka teploizolyatsiynykh vohnezakhysnykh materialiv. *Materialy Mizhnarodnoy naukovy-praktychnoy konferentsiyi «Problemy pozhezhnoy bezpeky–2022»*. Kharkiv: NUTSZU, 130–132.
10. Wang, Y., Xie, Q., Zhang, Y., Wang, Q., Sun, J. (2018). Sensitivity analysis of influencing factors on glass façade breakage in fire. *Fire safety journal*, 98, 38-47.
11. Chen, H., Zhao, H., Wang, Y., Wang, Q., Sun, J. (2017). The breakage of float glass with four-edge shading under the combined effect of wind loading and thermal loading. *Fire technology*, 53, 1233–1248.
12. Ballo, Y.V., Yakovchuk, R.S., Nizhnyk, V.V., Kagitin, O.I. (2022). Analysis and systematization of types of facade systems of buildings as a prerequisite for improving fire prevention measures. *Fire Security*, 40, 5–15. DOI: 10.32447/20786662.40.2022.01
13. Bonomo, P., Frontini, F., Saretta, E. (2018) Fire safety of BIPV facades. Guideline for the implementation of the existing normative framework. *Francesco Frontini SUPSI- Swiss BIPV Competence Centre* https://repository.supsi.ch/12676/1/Active_Interfaces_HSLU_SUPSI_Fire_Safety%20%281%29.pdf
14. Bedon, C. (2017). Structural glass systems under fire: overview of design issues, experimental research, and developments. *Advances in Civil Engineering*, 2017(1), 2120570.
15. 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).
16. 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.
17. Polupan, V.A., Rashkevich, N.V., Maiboroda, R.I., Otrosh, Yu.A., Shcholokov, E.E. (2022). Fire resistance of building structures as an element of the fire safety system. *The 1 International Scientific and Practical Conference "Current trends in the development of modern scientific thought"*. Haifa, Israel, 495–497.
18. Polupan, V.A., Maiboroda, R.I., Otrosh, Yu.A., Rashkevich, N.V. (2022). Criteria for choosing a method of fire protection of building structures. *Materials of the All-Ukrainian scientific and practical conference "Actual problems of fire safety and prevention of emergency situations in today's conditions"*. Lviv, LDU BZHD, 77–79.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., начальник кафедри автоматичних систем безпеки та інформаційних технологій Р.І. Шевченко, Національний університет цивільного захисту України, Україна.

Автор: МАЙБОРОДА Роман Ігорович старший викладач кафедри пожежної профілактики в населених пунктах Національний університет цивільного захисту України, Україна
E-mail – maiboroda.roman@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3461-2959>

Автор: РАШКЕВИЧ Ніна Владиславна доктор філософії, доцент кафедри пожежної профілактики в населених пунктах Національний університет цивільного захисту України
E-mail – nine291085@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5124-6068>

Автор: ОТРОШ Юрій Анатолійович доктор технічних наук, професор, начальник кафедри пожежної профілактики в населених пунктах Національний університет цивільного захисту України, Україна
E-mail – yuriyotrosh@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0698-2888>

Автор: КІРІЧЕНКО Дар'я Олексіївна доктор філософії, старший викладач кафедри будівельної механіки Одеська державна академія будівництва та архітектури
E-mail – dkirichenko@odaba.edu.ua
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8484-0925>

RESEARCH OF THE STABILITY OF TRANSPARENT FACADE STRUCTURES UNDER THE INFLUENCE OF HIGH TEMPERATURES

R. Maiboroda¹, N. Rashkevich¹, Yu. Otrosh¹, D. Kirichenko²

¹National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

²Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa, Ukraine

The authors in the scientific work described the results of studies of the stability of translucent structures of high-rise buildings under the influence of high temperatures. The researchers analyzed the mechanism of glass destruction in fire conditions, in particular, studied its reaction to sharp temperature fluctuations, the formation of cracks and subsequent destruction under the influence of thermal loads. The mechanism of fire propagation through window openings on the facade of a high-rise building was studied. The authors emphasize the importance of external factors, such as wind, on the spread of flames on glass facades, as well as the influence of structural features of buildings on the speed and nature of fire development. Using the PyroSim software package, a model of the destruction of

transparent structures of high-rise buildings during a fire was developed. The main stages of simulating the destruction of translucent structures are: preparation of the building model; setting fire scenarios; simulation of thermal processes; structural integrity analysis; fire spread calculation. The model allows predicting the behavior of structures. According to the simulation results of a probable fire, it should be noted that a double-glazed unit made of non-tempered glass with a thickness of 6 mm is destroyed by fire 260(\pm 10) seconds before the arrival of fire and rescue units. After the destruction of the double-glazed windows, thermal convection of the heated combustion products and flames occurs vertically, and the glazing of the upper floor located above the fire site is exposed to high temperatures. The maximum temperature, which is recorded using thermocouples, is on average 300-330 °C, which is quite close to the temperature values of 350 °C at which there is a high probability of destruction of a double-glazed unit made of untempered glass 6 mm thick. As a result, there is a high probability of fire spreading through the glazing to the floors above.

Keywords: *glass, destruction, fire, heat flows, PyroSim.*