

В.С. Некора

Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ РУЙНУВАННЯ СКЛІННЯ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ В УМОВАХ ТЕПЛОВОГО ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ

У статті подано основні результати математичного моделювання руйнування скління огороджувальних будівельних конструкцій в умовах пожежі. Отримано нові наукові дані щодо дослідження поведінки скління огороджувальних будівельних конструкцій в умовах теплового впливу пожежі шляхом математичного моделювання, що є підґрунтям для удосконалення методів розрахункової оцінки вогнестійкості огороджувальних конструкцій із світлопрозорими елементами.

Ключові слова: огороджувальні будівельні конструкції, скління, межа вогнестійкості, розрахунковий метод, термостійкість скла.

Постановка проблеми

Конструкції зі скляними світлопрозорими елементами використовуються в архітектурі, щоб надати будівлям модернізований зовнішній вигляд, завдяки великій площі скління фасадів всередину проникає максимум освітлення, а приміщення виглядають просторіше. Зокрема, фасадне скління використовується переважно при облаштуванні комерційних об'єктів (торгові центри і комплекси, офісні центри); адміністративних будівель, включно із вокзалами і об'єктами держслужб; котеджів та інших приватних будівель. Загалом це універсальний варіант, який підходить під різні архітектурні цілі.

Ще недавно ступінь вогнестійкості скляних конструкцій, зокрема вікон, не враховувався при загальному розрахунку рівня пожежної безпеки. Відбувалося це з тієї причини, що площа скляних будівель була порівняно мала і не грала істотної ролі. Потім ситуація почала змінюватися: скляні конструкції стали застосовуватися все частіше і частіше, і їх кількість тільки збільшувалася, наприклад, як офісні перегородки, облицювання фасадів сучасних споруд і т. д. У такій ситуації постає питання про те, що необхідно забезпечити пожежну безпеку цих матеріалів. Скле властиво руйнуватися під дією на нього найвищих температур, наслідком чого стає швидке надходження кисню до вогнища спалаху, що сприяє його подальшому поширенню [1, 2]. Зважаючи на це, мають бути наявні ефективні інструменти для оцінки вогнестійкості зазначених конструкцій, зокрема розрахунковий підхід. Такий підхід не є достатньо розвиненим і потребує всебічного вивчення та розвитку.

Для цього потрібне обґрунтування та впровадження математичних моделей поведінки скління

огороджувальних конструкцій в умовах пожежі та обґрунтування на їх основі розрахункового підходу до оцінки їх вогнестійкості.

З огляду на це, актуальними є дослідження, спрямовані на розвиток теоретичних основ та отримання нових наукових даних щодо поведінки скління в умовах теплового впливу пожежі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відомо, що існує розвинена система унормованих рекомендацій для розрахункового оцінювання вогнестійкості всіх типів будівельних конструкцій (ДСТУ EN 1363-1:2023 «Випробування на вогнестійкість. Частина 1. Загальні вимоги», ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги», ДСТУ-Н Б EN 1991-3:2012 «Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 3. Дії, викликані кранами та обладнанням», ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010 «Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд. Зміна № 1»). Водночас бракує системних рекомендацій для оцінювання вогнестійкості огороджувальних конструкцій зі склінням за розрахунковими методами, які обґрунтовані достатньо і потребують подальшого теоретичного і практичного розвитку.

Спрощені розрахункові методи оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій у своїй основі використовують або наявний широкий практичний експериментальний і розрахунковий досвід, узагальнений у вигляді довідникових таблиць і номограм, або інженерні розрахункові методики за простими математичними моделями, створеними на основі комплексу припущень та гіпотез опору матеріалів, що спрощують їх формулювання. За таких умов отримані результати дозволяють отримати продук-

тивний розрахунковий підхід, проте встановлені межі вогнестійкості конструкцій є суттєво завищеними і є причиною закладення у будівельні конструкції великих запасів вогнестійкості. Нормами ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010, що містять рекомендації щодо застосування розрахункових методів при проектуванні вогнестійких залізобетонних конструкцій, вказуються такі методи, як основні, базові, оскільки вони є дуже продуктивними, економічними та інженерно осяжними для широкого класу фахівців. У цьому контексті великі запаси вогнестійкості сприймаються радше як їхня перевага. Одним з найбільш ефективних підходів, що зазнав повсюдного застосування є метод на основі використання довідникових таблиць [1].

Уточнені методи у своїй основі мають загальний теоретичний підхід, який розуміє використання диференціальних рівнянь для описання стану речовини у точці. В ієрархії розрахункових методів оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій уточнені методи вважаються найскладнішими у реалізації, але такими, що мають найбільшу точність. Серед робіт, які описують основні підходи та рекомендації щодо реалізації методів цього методу, можна виділити такі [1–3].

Без суттєвого погіршення точності можуть бути створені порівняно прості математичні моделі, які дозволяють достатньо повно описувати всі перелічені процеси для ефективного прогнозування поведінки будівельних конструкцій зі склінням в умовах нагрівання при пожежі. Аналізуючи роботи [4, 5], можна дійти висновку, що для розв'язку задачі вогнестійкості цих будівельних конструкцій застосовується усталений, дещо спрощений підхід, заснований на припущенні незалежності теплових і механічних процесів всередині скла.

Вказані припущення дозволяють розділити задачу вогнестійкості на дві окремі основні задачі – теплову задачу та задачу аналізу напружено-деформованого стану у склінні, яку в роботах [1, 2] називають ще структурною задачею.

Результатом розрахунку на першому етапі при розв'язку теплової задачі є отримання температурних розподілів у визначені моменти часу теплового впливу пожежі. Ці результати вже на першому етапі дають змогу проаналізувати настання граничного стану втрати теплоізолювальної здатності таких будівельних конструкцій. Зазвичай розв'язок цієї задачі не є особливо складним і не потребує суттєвих затрат часу.

Наступним етапом є аналіз структурної задачі, що дозволяє прослідкувати настання граничного стану втрати вогнестійкості за тримальною здатністю. При постановці задачі міцності скління в умовах теплового впливу пожежі мають бути враховані суттєво нелінійна поведінка скла, поява великих деформацій, утворення тріщин та дефектів у склі, температурні деформації скла та помітне погіршення

їх механічних характеристик. Проте, незважаючи на суттєве полегшення розрахунків при застосуванні описаного підходу, поставлені задачі є складними. Складність записаних диференціальних рівнянь для їхнього розв'язку не дозволяє отримати прості аналітичні рішення для їх коректного інтегрування. Тому для виконання таких розрахунків мають бути застосовані наближені числові методи. Найбільш поширеним варіантом є застосування методу кінцевих різниць або методу кінцевих елементів. Такий досвід добре описаний у роботах [2–5].

Підсумовуючи викладене, слід зазначити, що уточнені розрахункові методи є ефективним засобом оцінки вогнестійкості конструкцій зі склінням при фіксації часу настання граничних станів втрати теплоізолювальної здатності та цілісності. Це підтверджується численними даними, викладеними у роботах [6–10], де проведена верифікація отриманих розрахункових даних шляхом їх порівняння із експериментальними даними, одержаними під час вогневих випробувань. Тому рекомендації, подані у нормативних документах ДСТУ-Н Б EN 1991-3:2012, ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010, визначають зазначені методи як надійні і такі, що можуть бути використані для оцінки вогнестійкості, як засіб, що дозволяє обґрунтувати необхідні вимоги, якщо нижчі за ієрархією методи не дали очікуваних результатів.

Особливої уваги заслуговує те, що зараз чинні нормативні документи [4] розвинених країн не містять рекомендацій щодо застосування розрахункових методів для оцінки теплоізолювальної здатності та цілісності за виключенням норм EN 15998:2020. Тобто наразі не існує методів розрахункової оцінки цілісності скління, що мали б апробовану практичну реалізацію, розвинену критеріальну базу, отримані оприлюднені результати із відповідною верифікацією. Норми EN 15998:2020 рекомендують розглядати настання граничного стану втрати цілісності з погляду можливості появи крихкого руйнування скла.

Розгляду проблеми розрахункової оцінки вогнестійкості скління за граничним станом втрати цілісності присвячено певну низку досліджень, результати яких наведено у роботах [4–6]. Ці роботи, результати яких увійшли як рекомендації у [4], стосуються того, що втрата цілісності пов'язана із настанням крихкого руйнування скла.

Мета статті

Мета дослідження полягає у вивченні закономірностей теплових процесів та механізмів руйнування скління огорожувальних будівельних конструкцій із світлопрозорими елементами в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі як наукового підґрунтя для удосконалення спрощеного розрахункового методу на основі довідникових таблиць.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- проаналізувати підходи до оцінювання вогнестійкості огорожувальних будівельних конструкцій із склінням експериментальними та розрахунковими методами;
- обґрунтувати математичні моделі щодо поведінки скління в умовах теплового впливу пожежі та провести відповідні числові дослідження з використанням цих моделей для вивчення закономірностей зміни характеристик теплових процесів та механізмів руйнування скління в елементах огорожувальних будівельних конструкцій при впливі стандартного температурного режиму пожежі;
- дослідити адекватність отриманих результатів розрахунку при їх порівнянні з експериментальними даними;
- на основі виявлених закономірностей зміни характеристик теплових процесів та механізмів руйнування скління в елементах огорожувальних будівельних конструкцій при впливі стандартного температурного режиму пожежі побудувати довідникові таблиці для оцінювання вогнестійкості скління огорожувальних конструкцій.

Виклад основного матеріалу

Об’єкт та гіпотеза дослідження.

Об’єктом дослідження є процеси нагрівання та руйнування скління огорожувальних будівельних конструкцій під час теплового впливу пожежі. У результаті вивчення цих процесів з використанням математичного моделювання встановлюються закономірності зміни характеристик цих процесів з метою побудови довідникових таблиць для розрахункового оцінювання вогнестійкості огорожувальних конструкцій зі склінням.

Для обґрунтування математичних моделей поведінки скління в умовах теплового впливу пожежі було розроблено комплекс гіпотез та припущень. Основною гіпотезою для обґрунтування математичних моделей є те, що процеси теплопровідності у склі не залежать від його напружено-деформованого стану і можуть визначатися окремо від його поточних параметрів. Критерієм руйнування скління під час нагрівання внаслідок пожежі є гранична термостійкість, що є максимальною різницею температур поверхонь скління і визначається через механічні характеристики скла. Поточне значення температур визначається через нестационарне диференціальне рівняння теплопровідності з врахуванням поглинання теплового випромінювання при його проходженні через шар скла. Закономірності зміни параметрів термомеханічних процесів у склі при тепловому впливі пожежі виявляються через проведення повного факторного числового експерименту в припущенні їх лінійної залежності від факторів. Адекватність

результатів математичного моделювання визначається статистичними критеріями, що встановлені на основі нормального розподілення випадкової величини.

Математична модель термомеханічних процесів у склінні при нагріві під час пожежі.

Традиційно задача оцінювання вогнестійкості для будь-якої конструкції розбивається на дві задачі – теплову та структурну [6, 7]. Теплова задача за підходом згідно із даними робіт [6, 7] може бути розв’язана за допомогою нестационарного диференціального рівняння теплопровідності, яке має такий вигляд:

$$C_p \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{I}{\ell} \exp(-x/\ell), \quad (1)$$

де $\ell = 0,001$ м – довжина затухання променистого теплового потоку у склі;

$I = 4350$ Вт/м² – поглинена склом частина променистого теплового потоку;

λ – коефіцієнт теплопровідності скла, Вт/(м·°C);

C_p – питома теплоємність скла, Дж/(кг·°C);

ρ – густина скла, кг/м³;

θ – поточна температура нагріву скла, °C;

t – поточний час, с.

З використанням зазначеного рівняння була поставлена крайова задача, геометрично відповідна нескінченній пластині, що має певну товщину. При цьому був використаний усталений підхід, що передбачає використання на краях розрахункової області граничних умов III роду.

На рис. 1 подана розрахункова схема шару скління.

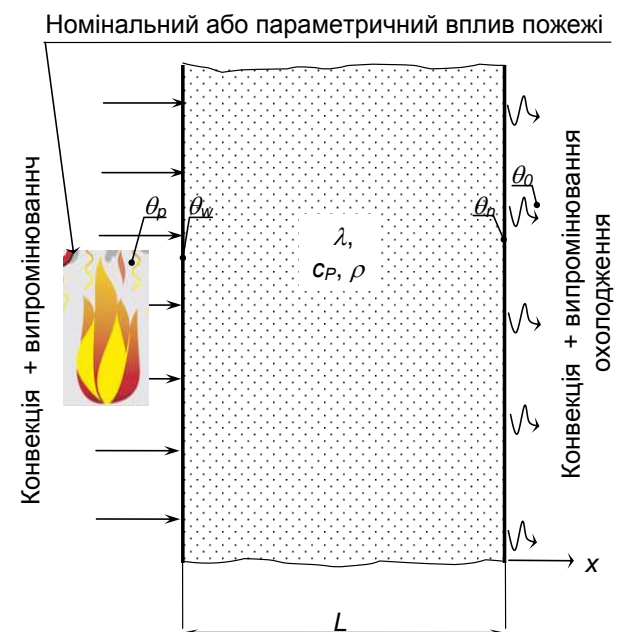


Рис. 1. Розрахункова схема до теплотехнічного розрахунку одного шару скління огорожувальної конструкції

Згідно з розрахунковою схемою (рис. 1) встановлюють граничні умови, що записують через вирази:

$$-\lambda(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial x}\Big|_{x=0} = \alpha(t)(\theta_p - \theta_w); \quad (2)$$

$$-\lambda(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial x}\Big|_{x=L} = \alpha_0(t)(\theta_n - \theta_0), \quad (3)$$

де $\alpha(t)$ – коефіцієнт тепловіддачі між поверхнею скла та повітрям у приміщенні із пожежею, Вт/(м²·°C);

$\alpha_0(t)$ – коефіцієнт тепловіддачі між поверхнею скла та повітрям у суміжному приміщенні без пожежі, Вт/(м²·°C);

θ_p – температура повітря у приміщенні із пожежею, °C;

θ_w – температура обігрівної поверхні скла, °C;

θ_n – температура необігрівної поверхні скла, °C;

$\theta_0 = 20$ °C – температура в приміщенні із пожежею.

Температура повітря у приміщенні із пожежею визначається за стандартним температурним режимом, який визначається за формулою:

$$\theta_p(t) = 345 \cdot \lg(8t + 1) + \theta_0. \quad (4)$$

Вирази щодо граничних умов мають два компоненти, що окремо враховують променистий та конвекційний теплообмін. У такому разі коефіцієнти тепловіддачі мають два компоненти і визначаються за виразами:

$$\alpha(t) = \alpha_k(t) + \alpha_r(t); \quad \alpha_0(t) = \alpha_{k0}(t) + \alpha_{r0}(t). \quad (5)$$

Для виразів (5) встановлюють коефіцієнти теплообміну, що записують через вирази:

$$\alpha_k(t) = 1.24 \sqrt[4]{\frac{\theta_p - \theta_w}{H_y}} \text{ при } H_y(\theta_p - \theta_w) < 15; \quad (6)$$

$$\alpha_k(t) = 1.27 \sqrt[3]{\theta_p - \theta_w} \text{ при } H_y(\theta_p - \theta_w) \geq 15; \quad (7)$$

$$\alpha_{k0}(t) = 5 + 0.45(\theta_p - \theta_w) \text{ при } \alpha_{k0}(t) \leq 50 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}; \quad (8)$$

$$\alpha_{k0}(t) = 50 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}} \text{ при } \alpha_{k0}(t) > 50 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}, \quad (9)$$

де H_y – найбільший вертикальний розмір одної

секції скління, м.

Складові коефіцієнтів тепловіддачі при врахуванні променистого теплообміну визначаються за виразами:

$$\alpha_r(t) = \varepsilon \cdot \sigma \left(\frac{(\theta_p + 273)^4}{\theta_p - \theta_w} - \frac{(\theta_w + 273)^4}{\theta_p - \theta_w} \right); \quad (10)$$

$$\alpha_{r0}(t) = \varepsilon \cdot \sigma \left(\frac{(\theta_n + 273)^4}{\theta_n - \theta_0} - \frac{(\theta_0 + 273)^4}{\theta_n - \theta_0} \right), \quad (11)$$

де $\varepsilon = 0,9$ – ступінь чорноти поверхні скла;

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·°C⁴) – константа Стефана-Больцмана.

При розрахунку температур скління із порожнинами теплообмін за рахунок конвекції між скляними поверхнями у порожнині можна враховувати при введенні коефіцієнта теплообміну $\alpha_{int} = 2,5$ Вт/(м²·°C).

При теплотехнічному розрахунку з використанням теплового потоку за рахунок теплового випромінювання мають використовуватися теплофізичні характеристики, наведені у табл. 1 [6, 7].

Таблиця 1

Узагальнені теплотехнічні характеристики конструкційного будівельного скла

Густина, ρ , кг/м ³	Коефіцієнт теплопровідності, λ , Вт/(м·°C)	Питома теплоємність, C_p , Дж/(кг·°C)
2500	0,95	850

При застосуванні прийнятого температурного режиму критерії R та E вважають забезпеченими, коли різниця температур на поверхнях, що обігривається та не обігривається, одного листа або шару скління не перевищує величини термостійкості скла $\Delta\theta_b$. Умову настання граничного стану втрати цілісності або тримальної здатності можна виразити через нерівність [3]:

$$\theta_w - \theta_n \leq \Delta\theta_b = \frac{f_b(1 - \mu)}{\beta E_b}, \quad (12)$$

де f_b – міцність скла, Па;

E_b – модуль пружності скла, Па;

μ – коефіцієнт Пуассона скла;

β – коефіцієнт терморозширення скла, °C⁻¹.

Можливо використовувати узагальнені характеристики, що визначають найменшу міцність та найбільшу жорсткість. Рекомендовані величини механічних характеристик наведені у табл. 2 [6].

Таблиця 2

Узагальнені механічні характеристики конструкційного будівельного скла

Міцність скла, f_b , МПа	Модуль пружності, E_b , МПа	Коефіцієнт Пуассона, μ	Коефіцієнт терморозширення, α , $^{\circ}\text{C}^{-1}$	Термостійкість, $\Delta\theta_b$, $^{\circ}\text{C}$
40	$7,3 \cdot 10^4$	0,23	$8,75 \cdot 10^{-6}$	48,219

Результати вивчення термостійкості скла під час теплового впливу пожежі.

З використанням поданого математичного апарату були проведені розрахунки, у результаті чого побудовано графік величини $\theta_w - \theta_n$ для звичайного конструкційного листового скла товщиною 5 мм, який наведений на рис. 2.

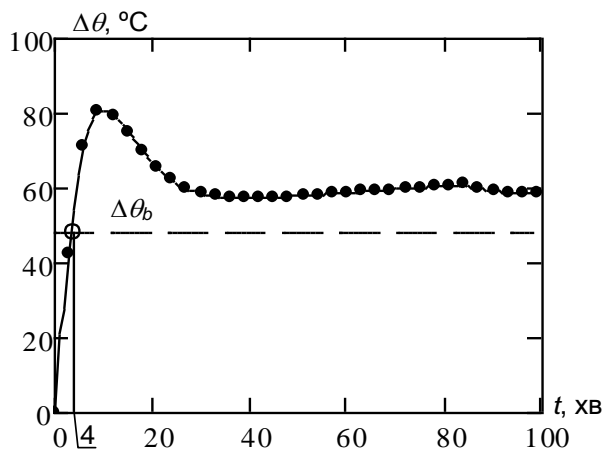


Рис. 2. Залежність різниці температури на поверхні, що обігривається, та середньої температури перегородки від часу перебігу пожежі

Як видно з рис. 2, руйнування одного шару скління товщиною 5 мм відбувається на 4 хв теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі. Такий результат узгоджується із даними, наведеними у роботі [9], і це підтверджує прийнятність запропонованого підходу.

З метою вивчення адекватності даних, отриманих у результаті теплового розрахунку, був проведений їх порівняльний аналіз із результатами експериментів.

З цією метою було проведено експериментальні дослідження.

Для здійснення експериментальних досліджень була використана вогнева піч, конструктивна схема якої представлена на рис. 3.

На рис. 4 зображена схема, за якою здійснювалися експериментальні дослідження.

На рис. 5 представлено процес проведення досліджень.

З використанням розробленої методики експериментальних досліджень були проведені відповідні експериментальні дослідження. Для здійснення

випробувань застосовується стандартний температурний режим пожежі, який представлений виразом (4) та поданий на рис. 6.

Результати експериментальних досліджень відображені на рис. 7 блакитною лінією тренду. Під час експериментального дослідження спостерігалось монотонне зростання температури на поверхні дослідних зразків.

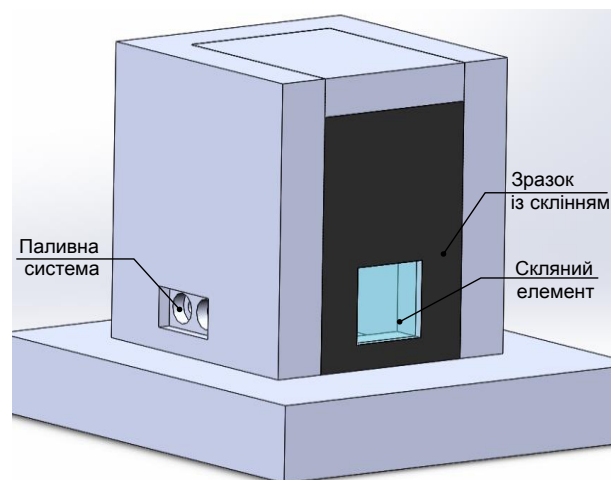


Рис. 3. Конструктивна схема вогневої печі

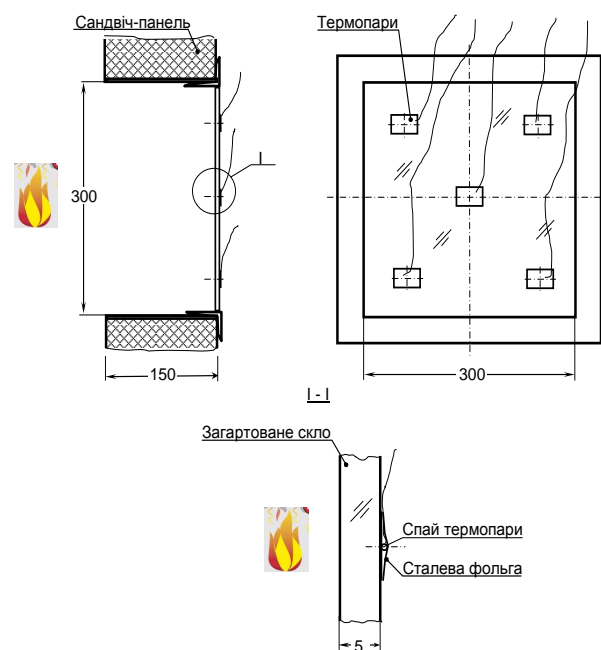


Рис. 4. Схема проведення експериментальних досліджень



Рис. 5. Процес проведення вогневих випробувань

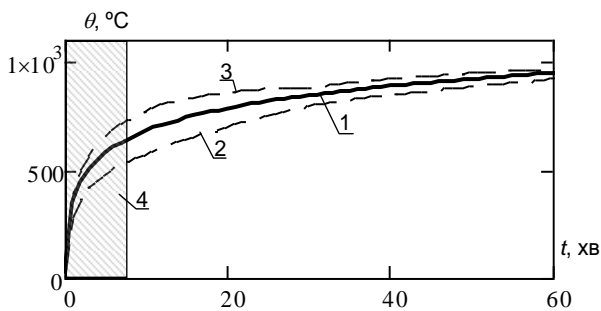


Рис. 6. Стандартний температурний режим:

1 – стандартний температурний режим; 2 – нижня допустима межа випробувань; 3 – верхня допустима межа випробувань; 4 – проміжок часу, протягом якого відхилення середньої температури неконтрольоване

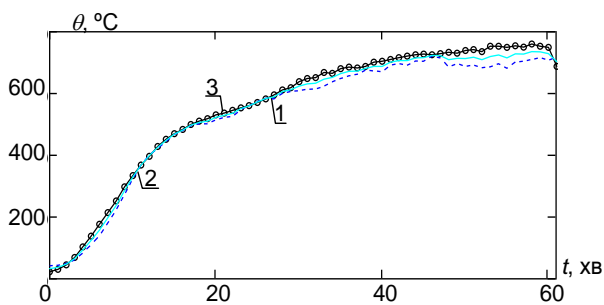


Рис. 7. Усереднені результати експериментальних досліджень: 1 – перше випробування; 2 – друге випробування; 3 – усереднена температура

Для встановлення адекватності отриманих розрахункових даних було здійснено їхній порівняльний аналіз із експериментальними даними із використанням статистичних критеріїв. Результати аналізу подані у табл. 3.

Таблиця 3
Статистичні параметри, отримані при дослідженні адекватності результатів розрахунку температури необігрівної сторони у зразках скління

Число ступенів вільності чисельника, ν_1	Число ступенів вільності знаменника, ν_2	Кількість експериментів, d	Кількість вимірювань в експерименті, n	Дисперсія відтворюваності	Дисперсія адекватності	Розрахункове значення F -критерію	Табличне значення F -критерію [10]	Середнє відносне відхилення, %	Середньоквадратичне відхилення, °C
2	124	2	62	0,6	0,6	0,95	1,01	13,8	15,3

Результати вивчення закономірностей зміни параметрів термомеханічних процесів у склінні під впливом пожежі.

Як основний параметр, що є критерієм руйнування скління під впливом пожежі, є час утворення візуальних тріщин у склі, що залежить від двох найбільш значущих факторів – товщини панелі скління та найбільшої довжини панелі скла без перемичок. Регресія для руйнування одношарового скління має лінійний характер та описується виразом типу:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2, \quad (13)$$

де b_0, b_1, b_2, b_3 – коефіцієнти регресії;

x_1, x_2 – фактори повного факторного експерименту.

Зважаючи на матрицю плану повного факторного числового експерименту, були встановлені інтервали варіювання, які наведені у табл. 4.

Таблиця 4
Діапазони варіювання факторів

Товщина скла, h , мм			Найбільша довжина панелі скла без перемичок, l , мм		
Найменше значення, h_{-1}	Середнє значення, h_0	Найбільше значення, h_1	Найменше значення, l_{-1}	Середнє значення, l_0	Найбільше значення, l_1
$l_y/l_x = 1,5$					
2	4	6	1,5	3,5	5,5
$l_y/l_x = 2$					
2	4	6	1,5	3,5	5,5

Після проведення відповідних розрахунків було отримано величини коефіцієнтів регресії, які наведені у табл. 5.

Таблиця 5
Коефіцієнти регресії часу втрати термостійкості для одношарового скла

Коефіцієнти регресії		b_0	b_1	b_2	b_3
Кодовані значення	$l_y/l_x = 1,5$	10,63	-2,88	-1,63	0,88
Реальні величини		22,28	-2,20	-1,69	0,22
Кодовані значення	$l_y/l_x = 2$	10,45	-2,05	-1,45	1,05
Реальні величини		20,76	-1,94	-1,78	0,26

На основі отриманих даних була побудована таблиця, що дозволяє проводити розрахункове оцінювання вогнестійкості скління з одношаровими панелями (табл. 6).

Таблиця 6
Геометричні розміри для скління з одношарового скла

Клас вогнестійкості	Суцільне скло			
	$l_y/l_x \leq 1,5$		$1,5 < l_y/l_x \leq 2$	
	Висота, м	Товщина, мм	Висота, м	Товщина, мм
E 15	$\leq 3,2$	≤ 3	$\leq 2,5$	≤ 3
E 30	–	–	–	–

Використовуючи табл. 6, можна проєктувати огорожувальні конструкції зі склінням відповідно до заданого класу вогнестійкості.

Висновки

Шляхом проведених досліджень було вирішено актуальне науково-технічне завдання щодо вивчення закономірностей теплових процесів та механізмів руйнування скління огорожувальних будівельних конструкцій зі світлопрозорими елементами в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі як наукового підґрунтя для удосконалення спрощеного розрахункового методу на основі довідникових таблиць. Зокрема, можна виділити такі основні результати:

1. Проаналізовано наявні підходи до розрахункового оцінювання вогнестійкості огорожувальних будівельних конструкцій зі склінням, на основі чого показано актуальність задач їхнього удосконалення.
2. Обґрунтовано математичні моделі щодо поведінки скління в умовах теплового впливу пожежі та проведено відповідні числові дослідження з використанням цих моделей.
3. Досліджено адекватність отриманих розра-

хункових даних щодо температурних показників скління під впливом стандартного температурного режиму пожежі шляхом порівняльного аналізу з експериментальними даними, який показав що отримані результати є адекватними, оскільки відносна похибка не перевищує 13,8 %, а критерій Фішера не перевищує табличного значення.

4. На основі проведення повного факторного експерименту виявлено закономірність часу руйнування скління залежно від товщини панелі скла (h) та найбільшої довжини панелі скла без перемичок (l) у вигляді регресійних залежностей:

– одношарове скло з відношенням сторін, що дорівнює 1,5: $U_e = 22,28125 - 2,203125h - 1,6875l + 0,21875 \cdot h \cdot l$;

– одношарове скло з відношенням сторін, що дорівнює 2: $U_e = 20,7625 - 0,94375h - 1,775l + 0,2625 \cdot h \cdot l$.

5. На основі отриманих закономірностей були побудовані довідникові таблиці для розрахункового оцінювання вогнестійкості огорожувальних конструкцій із одношаровим склінням.

Література

1. Long T. Phan, Therese P. McAllister, John L. Gross, Morgan J. Hurley. *Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings*. NIST Technical Note 1681, (2010). 217 p.
2. Drozdov V.A., Savyn V.K., Aleksandrov Yu.P. *Heat transfer in translucent enclosing structures*, (1979). 307 p.
3. K. Machalická, M. Charvátová, M. Eliášová, P. Kuklík. *Czech Technical University in Prague. The behavior of fire resistant glass under fire*.
4. *A Guide to Best Practice in the Specification and Use of Fire-Resistant Glazed Systems*. Glass and Glazing Federation in UK.
5. *Improvement of the Assessment Method for Fire Resistance of Steel Structures in the Temperature Regime of Fire under Realistic Conditions* // *Materials Science Forum* / Taras Shnal, Serhii Pozdieiev, Oleksandr Nuianzin, Stanislav Sidnei / 2020 Volume 1006 – pp. 107 – 116.
6. Cuzzillo, B. R. *Thermal Breakage of Double-pane Glazing by Fire* / B.R. Cuzzillo, P.J. Pagni // *Journal of Fire Prot. Engr.* – 1998. – Vol. 9, No 1. – P. 1–11.12.
7. Bansal, N.P. *Handbook of Glass Properties* / N.P. Bansal, R.H. Doremus. – NY.: Academic Press Inc., 1986. – 680 p.
8. McLellan, G.W. *Glass Engineering Handbook* / G.W. McLellan, E.B. Shand. – NY.: McGrawHill Book Co., 1984. – 484 p.
9. Y. Wang, Q. Wang, G. Shao et al., “Fracture behavior of a four-point fixed glass curtain wall under fire conditions, *Fire Safety Journal*, vol. 67, pp. 24–34, 2014.
10. Перельмутер А.В. *Расчетные модели сооружений и возможность их анализа* / Перельмутер А.В., Сливкер В.И. – К.: Изд-во «Сталь», 2002. – 600 с.

References

1. Long T. Phan, Therese P. McAllister, John L. Gross, Morgan J. Hurley. (2010). *Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings*. NIST Technical Note 1681.
2. Drozdov V.A., Savyn V.K., Aleksandrov Yu.P. (1979).

Heat transfer in translucent enclosing structures.

3. K. Machalická, M. Charvátová, M. Eliášová, P. Kuklík. (2016). The behavior of fire resistant glass under fire. *Conference ICSA 2016*.
4. *A Guide to Best Practice in the Specification and Use of Fire-Resistant Glazed Systems* (2009). Issue 4. Glass and Glazing Federation in UK.
5. Taras Shnal, Serhii Pozdieiev, Oleksandr Nuianzin, Stanislav Sidnei (2020). Improvement of the Assessment Method for Fire Resistance of Steel Structures in the Temperature Regime of Fire under Realistic Conditions. *Materials Science Forum* / Volume 1006. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.107>
6. Cuzzillo, B.R., Pagni, P.J. (1998). Thermal Breakage of Double-pane Glazing by Fire. *Journal of Fire Prot. Engr. Vol. 9, No 1*. DOI: 10.1177/104239159800900101
7. Bansal, N.P., Doremus R.H. (1986). *Handbook of Glass Properties*. NY.: Academic Press Inc.
8. McLellan, G.W., Shand E.B. (1984). *Glass Engineering Handbook*. NY.: McGrawHill Book Co.
9. Y. Wang, Q. Wang, G. Shao et al. (2014). Fracture behavior

of a four-point fixed glass curtain wall under fire conditions. *Fire Safety Journal*, vol. 67. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.05.002

10. Perelmuter, A.V., Slivker V.I. (2002). *Calculation models of structures and the possibility of their analysis*. K.: Publishing house "Stal".

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Поздєєв, Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Україна.

Автор: НЕКОРА Валерія Сергіївна
ад'юнкт

Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України

E-mail – valerianekora@gmail.com

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4354-4422>

RESEARCH OF THE DESTRUCTION CONDITIONS OF GLAZING OF ENCLOSING STRUCTURES UNDER THE CONDITIONS OF THERMAL INFLUENCE OF FIRE

V. Nekora

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of the National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

The article presents the main results of mathematical modelling of the destruction of glazing of enclosing building structures with translucent elements under fire conditions. The authors analyse literature data on calculating the fire resistance of enclosing building structures with glazing. The results show that improving methods for predicting the fire resistance of glazing is relevant. Mathematical models for the numerical study of the behaviour of glazing under the thermal influence of the standard fire temperature regime are substantiated. Mathematical models of the heat transfer process involve using a non-stationary differential equation of heat conduction with boundary conditions of the third kind, accounting for the convective and radiant heat exchange between the air in the room with the fire and the glazing. As a criterion for the destruction of glazing under the influence of fire, the authors establish the temperature resistance parameter, which is determined based on the mechanical characteristics of the glass. The article highlights the relevant data on the study of temperature indicators and the mechanism of glazing failure, using mathematical modelling with well-founded mathematical models. It obtains the results of the thermal calculation by applying the finite difference method for solving the non-stationary differential equation of thermal conductivity. The methodology for determining the time of glazing failure under the influence of the standard temperature regime of a fire using the calculation parameters obtained based on well-founded mathematical models is substantiated. An analysis of the adequacy of the obtained calculation data was carried out by comparing them with the results of experimental studies using statistical criteria. As a result of the analysis, the authors confirmed the validity of the calculation data. A complete factorial experiment was conducted based on well-founded mathematical models, which revealed the regularities of the dependence of the parameters of thermomechanical processes in single-layer glass on its structural characteristics. The revealed regularities have the form of linear regression dependences of the destruction time on the thickness of the glazing and the maximum length of the glass panel without bars. Using the regularities of the dependence of the parameters of thermomechanical processes in single-layer glazing on its structural characteristics, the authors constructed reference tables for evaluating the fire resistance of enclosing structures with glazing. The research obtained new scientific data on the study of the behaviour of glazing of enclosing building structures under the thermal influence of fire through mathematical modelling, which is the basis for improving the methods of calculating the fire resistance of enclosing structures with translucent elements.

Keywords: enclosing building structures, glazing, fire resistance limit, calculation method, glass heat resistance.