

Національний університет цивільного захисту України
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Некора Валерія Сергіївна

УДК 614.841.45

ДИСЕРТАЦІЯ
УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКОВОЇ ОЦІНКИ
ВОГНЕСТІЙКОСТІ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ
СКЛЯНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

Спеціальність – 261 «Пожежна безпека»

Галузь знань - 26 «Цивільна безпека»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Валерія НЕКОРА

Науковий керівник: **Мирошник Олег Миколайович**

доктор технічних наук, професор

Черкаси – 2025

АНОТАЦІЯ

Некора В.С. Удосконалення методу розрахункової оцінки вогнестійкості огорожувальних конструкцій із скляними елементами – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 «Пожежна безпека». – Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, 2025.

Актуальність теми дослідження. Найбільш поширеними будівельними конструкціями зі скла є світлопрозорі елементи огорожувальних конструкцій, зовнішні та внутрішні несучі конструкції для реалізації особливих архітектурних рішень, масивні декоративні елементи інтер'єру та екстер'єру будівель. При цьому, руйнування конструкцій зі скла в умовах пожежі є одним із факторів пожежної небезпеки, оскільки збільшує ризик поширення пожежі, а також ризик загибелі та травмування людей.

Відомо, що сучасна нормативна база, що є чинною і в Україні містить настанови щодо методів для розрахункового оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій. Вказані нормативні документи відповідають другим частинам європейських норм із настановами щодо проектування будівельних конструкцій, тобто Єврокодів. Водночас, дані норми не містять таких настанов для оцінки вогнестійкості СПК.

Відомо, що серед причин нещасних випадків вагоме місце займає падіння, обвалення, обрушення конструкцій та матеріалів, а також дія предметів, що розлітаються. Всі перелічені чинники мають місце при настанні аварійного стану будівельних конструкцій при пожежі. Суттєву небезпеку при цьому становлять у тому числі скляні елементи будівельних огорожувальних конструкцій, оскільки часто вони є частиною протипожежних перешкод. Їх обвалення є особливо небезпечним при евакуації людей та роботі аварійно-рятувальних підрозділів. Існуючі підходи до оцінювання вогнестійкості скляних конструкцій є достатньо ефективними та мають під собою теоретичну та

практичну базу, проте, вони не є систематизованими та узагальненими в єдину ієрархічну систему, що могла бути втілена при складанні відповідного нормативного документа щодо настанов проектування вогнестійких огорожувальних конструкцій із склінням.

Розкриття закономірностей зміни параметрів теплових процесів та напружено-деформованого стану у скляних елементах огорожувальних конструкцій у результаті теплового впливу пожежі є актуальним науково-технічним завданням, розв'язання якого дозволяє створити наукове підґрунтя для удосконалення методів розрахункового оцінювання вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій. Наявність таких удосконалених методів може бути передумовою щодо забезпечення відповідності огорожувальних конструкцій із СПК необхідним класам вогнестійкості і як результат цього підвищення рівня пожежної безпеки будівель та споруд у цілому.

Мета роботи полягає у розкритті закономірностей змінення параметрів теплових процесів та напружено-деформованого стану у скляних елементах огорожувальних конструкцій в умовах теплового впливу пожежі як наукового підґрунтя для удосконалення стандартизованих методів розрахункового оцінювання їх вогнестійкості.

Основні задачі дослідження:

1. Провести аналіз статистичних відомостей щодо пожеж в Україні за останні роки, а також провести аналіз нормативної бази України та інших країн у галузі нормування вимог щодо вогнестійкості огорожувальних конструкцій із склінням.
2. Обґрунтувати математичну модель поведінки скляних елементів огорожувальних конструкцій в умовах нагрівання під тепловим впливом пожежі та визначити на її основі температурні режими нагрівання та умови руйнування даних скляних елементів
3. Розробити методику та провести вогневі випробування зразків скляних елементів огорожувальних конструкцій з метою дослідження їхніх

температурних та деформаційних показників при тепловому впливі стандартного температурного режиму пожежі;

4. На основі отриманих експериментальних даних дослідити адекватність розрахункових даних шляхом їхнього порівняння із одержаними експериментальними даними;
5. Шляхом проведення повного факторного експерименту виявити закономірності залежності межі вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій від їхніх конструктивних параметрів і на їх основі обґрунтувати удосконалений метод оцінювання вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій.

Об’єкт досліджень – процеси теплообміну деформування та руйнування скляних елементів огорожувальних конструкцій при тепловому впливі пожежі.

Предмет досліджень – вплив конструктивних характеристик скляних елементів огорожувальних будівельних конструкцій на прогнозовані параметри часу фіксації граничних станів втрати вогнестійкості скляних елементів при тепловому впливі пожежі.

Науковою новизною дисертації є розкриття закономірностей залежностей часу настання граничних станів втрати вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій внаслідок розтіскування та руйнування скла за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі. Встановлені закономірності є науковим підґрунтям для удосконалення методу розрахункового оцінювання вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій. При цьому вперше:

- виявлено закономірності зміни часу втрати вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій залежно від їхньої товщини (h) та найбільшого габаритного розміру (l), що наближені за допомогою регресійних залежностей і які мають вигляд:

одношарове скло із відношенням сторін, що дорівнює 1.5, $U_e = 22.28125 - 2.203125h - 1.6875l + 0.21875 \cdot h \cdot l$;

одношарове скло із відношенням сторін, що дорівнює 2, $U_e = 20.7625 - 0.94375h - 1.775l + 0.2625 \cdot h \cdot l$;

однокамерний склопакет із відношенням сторін, що дорівнює 1.5, $U_e = 19.90625 - 1.890625 h - 0.9375 l + 0.09375 \cdot h \cdot l$;

однокамерний склопакет із відношенням сторін, що дорівнює 2, $U_e = 21.525 - 2.16875 h - 1.55 l + 0.2125 \cdot h \cdot l$;

двокамерний склопакет із відношенням сторін, що дорівнює 1.5, $U_e = 20.91875 - 1.740625 h - 0.6125 l + 0.00625 \cdot h \cdot l$;

двокамерний склопакет із відношенням сторін, що дорівнює 2, $U_e = 19.325 - 1.44375 h - 0.65 l + 0.0125 \cdot h \cdot l$.

- з урахуванням виявлених закономірностей запропоновано довідникові таблиці щодо встановлення вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій залежно від товщини та найбільшого габаритного розміру скляних панелей.

Набули подальшого розвитку спрощені стандартизовані методи розрахункового оцінювання вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій за допомогою запропонованих довідникових таблиць.

Удосконалено науково-методичну базу для забезпечення відповідності скляних елементів огорожувальних конструкцій нормативним вимогам щодо їхньої вогнестійкості.

Практичне значення отриманих результатів полягає в обґрунтуванні удосконаленого методу розрахункового оцінювання вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій при тепловому впливі пожежі із стандартним температурним режимом, що дозволяє визначити відповідність скляних елементів огорожувальних конструкцій встановленому класу вогнестійкості. Даний метод має високу продуктивність і може бути частиною ієрархії методів оцінювання вогнестійкості даних конструкцій, що пропонується використовувати як базові відповідними нормативними настановами. Запропоновані у роботі довідникові таблиці дозволяють їхнє використання при

обґрунтуванні експрес-методів встановлення відповідності огорожувальних конструкцій із склінням вимогам щодо їхньої пожежної безпеки.

Запропонований удосконалений метод розрахункового оцінювання огорожувальних конструкцій із склінням впроваджено до проекту державного стандарту України «Пожежна безпека. Проектування огорожувальних конструкцій із склінням. Вогнестійкість. Основні положення» при здійсненні науково-дослідної діяльності в Інституті державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту при аналізі пожежної безпеки будівельних конструкцій, у навчальний процес Національного університету цивільного захисту України під час викладання навчальної дисципліни «Пожежна безпека будівель та споруд» та практичну діяльність приватного підприємства «ПроектБудСтар» шляхом використання методик оцінювання вогнестійкості огорожувальних конструкцій із скляними елементами при аналізі пожежної безпеки об'єктів будівництва.

Методи дослідження. Для дослідження поведінки скління в умовах пожежі використано метод вогневих випробувань. При дослідженні закономірностей настання граничних станів втрати вогнестійкості скління застосовано метод математичного моделювання. Для дослідження умов настання граничного стану втрати цілісності скління використано спрощений метод граничної термостійкості скла. Для вивчення адекватності та достовірності даних щодо поведінки скління в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі, отриманих експериментальним та розрахунковим шляхом, застосовані методи математичної статистики. Для побудування регресійних залежностей щодо меж вогнестійкості скління було здійснено повний факторний числовий експеримент.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій доводиться даними аналізу наукових праць даної галузі; узгодженістю методів дослідження із поставленими в роботі метою і завданнями; достатнім та необхідним обсягом отриманих даних при проведенні експериментальних досліджень, відповідних стандартизованим методам

випробувань і використанні метрологічно атестованого обладнання та повірених засобів вимірювання; прийнятною збіжністю результатів числових та експериментальних досліджень, а також відповідною апробацією та практичним впровадженням отриманих результатів у ході проведених досліджень.

У **вступі** наведено загальні дані щодо дисертації, виконано обґрунтування актуальності теми дисертації, здійснено формулювання мети та задач дисертації, здійснено визначення об'єкту та предмету дослідження. Також розкрита наукова новизна та практичне значення одержаних наукових результатів, розкритий зв'язок дисертаційних досліджень із державними науковими програмами, актуальними напрямками та темами науково дослідних робіт, які проводяться в університеті, зазначений особистий внесок здобувача. Також наведені результати апробації, загальні відомості про публікації, структуру та кількісні дані про зміст роботи.

У **першому розділі** деталізовані дані аналізу основних методів оцінювання вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій та їхнього нормування. Описано методики здійснення підходів до оцінювання пожежної небезпеки огорожувальних конструкцій із склінням. Викладені недоліки та переваги існуючих методів оцінювання вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій. Розкрито залежність поведінки скління в умовах пожежі від зміни внутрішньої структури скла у результаті нагрівання. З огляду на одержані аналітичні дані була сформульована мета та основні задачі дисертаційного дослідження.

У **другому розділі** обґрунтовані математичні моделі теплових процесів, напружено-деформованого стану та умов руйнування скляних панелей при їхньому нагріванні у результаті теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі. З використанням обґрунтованих математичних моделей було виконано розрахунки температурних розподілів, різниці температур на обігрівні та необігрівні поверхнях скляних панелей, а також характеристик напружено-деформованого стану у скляних панелях та положення їхніх зруйнованих ділянок. Встановлено час настання руйнування скляної панелі $1000 \times 1000 \times 4$ за

уточненим методом та спрощеним методом граничної термостійкості скла. Показано добру збіжність даних методів.

У **третьому розділі** викладено описання експериментального обладнання, необхідного для здійснення вогневих випробувань скляних панелей різного типу в умовах нагрівання унаслідок теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі. Разом із тим, у даному розділі також подано методики виготовлення зразків та спосіб встановлення на них термопар, запропоновано схему улаштування системи фіксації термопар на необігрівній поверхні зразків скляних панелей. Описана методика проведення вогневих випробувань зразків із скляними панелями з використанням вогневої печі із пальниками, що формують вогневі факели шляхом спалювання дизельного палива. Описаний спосіб обробки, узагальнення та інтерпретації температурних вимірювань під час проведення експериментів.

Четвертий розділ присвячений викладенню результатів вогневих випробувань зразків скляних панелей в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі. Під час вогневих випробувань було отримано температурні дані нагрівання багатошарових скляних панелей з гартованого та звичайного віконного силікатного скла, фрагментів однокамерних та двокамерних панелей, а також панелі з внутрішнім прошарком з термозахисного гелю. Було оцінено адекватність та достовірність отриманих у результаті експерименту температурних даних шляхом аналізу статистичних критеріїв Кохрена та Фішера. Також було проведено вивчення адекватності отриманих розрахункових даних у порівнянні із експериментальними даними на основі середньої відносної похибки, середньоквадратичного відхилення та критерію Фішера. Проведений аналіз показав прийнятну адекватність отриманих результатів

У **п'ятому розділі** викладені результати проведеного повного факторного числового експерименту, які дозволили отримати регресійні залежності настання втрати вогнестійкості скління від найбільш значущих параметрів товщини та найбільшого габаритного розміру скління. На основі отриманих

регресійних залежностей було створено довідникові таблиці для розрахункового оцінювання вогнестійкості скління, а також побудовано відповідні номограми. Отримані результати були використані для обґрунтування ієрархічної структури методів розрахункового оцінювання вогнестійкості скління, що є основою для створення стандарту України, що є настановою для проектування вогнестійких огорожувальних конструкцій із склінням.

Ключові слова: скло, огорожувальні конструкції, вогнестійкість, вплив вогню, пожежна безпека, комп'ютерне моделювання, математична модель, розрахунковий метод.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. С. Поздєєв, В. Некора, О. Некора, В. Ніжник. Дослідження поведінки огорожувальних конструкцій із склінням в умовах теплового впливу вогню. Вісті Донецького гірничого інституту. №2 (53), 2023. С. 83-91. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2024-1-82-91> – 0.5.

2. В. Ніжник, О. Савченко, В. Некора. Теоретичні підходи для дослідження закономірності впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику. «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація», Том 7 № 1 (2023). С. 67-76. <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.1.67.76> – 0.5

3. В. Некора. Дослідження умов руйнування скління огорожувальних конструкцій в умовах теплового впливу пожежі. Комунальне господарство міст. Том 4 № 185 (2024): Серія: Технічні науки та архітектура. С. 178-185. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-4-185-178-185> – 1

4. В. Некора, С. Поздєєв, О. Некора, С. Федченко, В. Ніжник, Т. Шналь. Математичне моделювання поведінки скляної панелі в умовах нагріву при пожежі. Том 8 № 2 (2024): Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України

«Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація». С. 57-73.
<https://doi.org/10.31731/2524.2636.2024.8.2.57.73> – 0.5

**Публікації у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази
 «Scopus»**

5. S. Pozdieiev, V. Nizhnyk, Yu. Feshchuk, V. Nekora, O. Nuianzin, T. Shnal. Investigation of the influence of the configuration of the fire furnace chamber on the temperature regime during the implementation of tests for fire resistance. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2021, 4(1-112), P. 4–40.
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239235> - 1

6. Yu. Feshchuk , V. Nizhnyk, V. Nekora, O. Teslenko. Improving The System For Responding To Fire In Areas Contaminated By The Chernobyl Disaster. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences, 2022, 1(451), P. 152–158.
<https://doi.org/10.32014/2022.2518-170X.152> – 1.

7. V. Nekora, S. Pozdieiev, O. Nekora, S. Fedchenko, V. Nizhnyk, A. Novhorodchenko, Taras Shnal. Determining the behavior of a glass panel under heating conditions during a fire. . Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 1 No. 1 (133) (2025): Engineering technological systems.
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.320431>

Список публікацій, які засвідчують апробацію дисертації

8. V. Nizhnyk, S. Pozdieiev, V. Nekora, O. Teslenko. Substantiation of the Method for Studying the Behavior of Enclosing Structures with Glazing Under Conditions of Fire Thermal Influence. Lecture Notes in Civil Engineering, 2024, 438, P. 273–285. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_28.

9. Nizhnyk, V., Feshchuk, Y., Nekora, V., Subota, A., Shnal, T. Investigation of the temperature impact of fire through the window opening of a house with a flammable facade on elements of adjacent objects. AIP Conference Proceedings, 2023, 2684, 030031. <https://doi.org/10.1063/5.0120106>.

10. V. Nizhnyk, O. Savchenko, Ya. Ballo, V. Nekora. Theoretical Approaches to Justify the Coefficients of Influence of Fire Protection Systems on Individual Fire Risk. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2023, 290 LNCE, P. 299–306. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14141-6_30.

11. V. Nekora, S. Sidnei, T. Shnal, O. Nekora, The Improvement of the Method to Determine the Temperature in Steel Reinforced Concrete Slabs in Assessment of their Fire Resistance. *Materials Science Forum*, 2022, 1066, P. 216–223. <https://doi.org/10.4028/p-3gvljr>.

ABSTRACT

Nekora Valeriia. Improvement of the method of calculation assessment of fire resistance of enclosing structures with glass elements – Qualification scientific work on manuscript rights.

Thesis for the degree of Ph.D. in Technology in specialty 261 "Fire Safety". – National University of Civil Defense of Ukraine, Cherkasy, 2025.

Relevance of the research topic. Enclosing structures made of glass are used as translucent elements of enclosing structures, external and internal load-bearing structures in the implementation of unique architectural solutions, massive decorative elements of the interior and exterior. At the same time, the destruction of such structures during a fire poses a fire hazard, as it contributes to the spread of fire and is the cause of the emergence of dangerous fire factors.

It is known that the modern regulatory framework, which is also valid in Ukraine, contains guidelines on calculation methods for assessing the fire resistance of building structures. These regulatory documents fully comply with the second parts of the guidelines for the design of building structures, i.e. Eurocodes. At the same time, these standards do not contain such guidelines for assessing the fire resistance of translucent structures.

It is known that among the causes of accidents, a significant place is occupied by falls, collapses of structures and materials, as well as scattering of fragments. All of the listed reasons occur in the event of an emergency state of construction structures during a fire. A significant danger in this case is posed by glass elements of building enclosing structures, since they are often part of fire barriers. Their collapse is especially dangerous during the evacuation of people and the work of emergency and rescue units. Existing approaches to assessing the fire resistance of glass structures are quite effective and have a theoretical and practical basis, however, they are not systematized and generalized into a single hierarchical system that could be implemented when drawing up the relevant regulatory document on guidelines for the design of fire-resistant enclosing structures with glazing.

Revealing the patterns of changes in the parameters of thermal processes and the stress-strain state in glass elements of enclosing structures under the thermal effects of fire changes in the parameters of thermal processes and the stress-strain state in glass elements of enclosing structures under the thermal effects of fire is an urgent scientific and technical task, the solution of which allows creating a scientific basis for improving the methods of calculating the fire resistance of glass elements of enclosing structures. The presence of such improved methods can be a prerequisite for ensuring the compliance of enclosing structures with glazing with the required fire resistance classes and, as a result, increasing the level of fire safety at construction sites as a whole.

The purpose of the work is to reveal the patterns of changes in the parameters of thermal processes and the stress-strain state in glass elements of enclosing structures under the thermal effects of fire as a scientific basis for the development of standardized calculation methods for assessing their fire resistance.

Main research objectives:

1. Conduct analytical research on statistical data on fires in Ukraine in recent years, as well as examine the regulatory framework of Ukraine and other countries in the field of standardization of fire resistance of enclosing structures with glass elements;

2. Develop a methodology for experimental research of enclosing structures with glass elements based on their fire tests to study temperature and deformation indicators under the influence of a standard temperature mode of fire;
3. Develop a methodology and determine on its basis the temperature dependences of the thermophysical characteristics of glass elements of enclosing structures, as well as explore the patterns of occurrence of critical temperatures and deformations using the identified patterns and design parameters of the studied glass elements of enclosing structures;
4. Develop a methodology for mathematical modeling of the behavior of enclosing structures with glass elements and the conditions for the occurrence of limit states of loss of their fire resistance under the influence of a standard temperature mode of fire;
5. Develop a methodology for calculating the fire resistance of enclosing structures with glass elements under the influence of a standard temperature mode of fire.

The object of research is the processes of heat exchange and force interaction in glass elements of enclosing building structures during their deformation and destruction under the thermal effects of fire.

The subject of research is the influence of the design parameters of glass elements of enclosing building structures on the predicted parameters of the time of occurrence of limit states of loss of fire resistance under the conditions of thermal exposure of the standard temperature mode of fire.

The scientific novelty of the thesis consists in revealing the patterns of dependence of the time of occurrence of the limit states of loss of thermal insulation capacity and integrity in glass elements of enclosing structures due to cracking and destruction of glass under the thermal influence of the standard temperature mode of fire. The established patterns are the scientific basis for improving the method of calculating the fire resistance of glass elements of enclosing structures. For the first time:

The revealed patterns are approximated by regression dependencies of the time of loss of thermal resistance on the width (h) and the maximal length (l) of glass elements of enclosing structures, which have the form:

- single-layer glass with an aspect ratio of 1.5, $U_e = 22.28125 - 2.203125h - 1.6875l + 0.21875 \cdot h \cdot l$
 - single-layer glass with an aspect ratio of 2, $U_e = 20.7625 - 0.94375h - 1.775l + 0.2625 \cdot h \cdot l$
 - single-chamber double-glazed window with an aspect ratio of 1.5, $U_e = 19.90625 - 1.890625 h - 0.9375 l + 0.09375 \cdot h \cdot l$
 - single-chamber double-glazed window with an aspect ratio of 2, $U_e = 21.525 - 2.16875 h - 1.55 l + 0.2125 \cdot h \cdot l$
 - two-chamber double-glazed window with an aspect ratio of 1.5, $U_e = 20.91875 - 1.740625 h - 0.6125 l + 0.00625 \cdot h \cdot l$
 - two-chamber double-glazed window with an aspect ratio of 2, $U_e = 19.325 - 1.44375 h - 0.65 l + 0.0125 \cdot h \cdot l$.
- taking into account the revealed patterns of time of loss of thermal resistance from the structural parameters of glazing, an improved method of calculating the fire resistance of enclosing structures with glazing based on reference tables has been proposed.

The application of simplified standard methods for calculating the fire resistance of enclosing structures with glazing using the proposed reference tables *has been further developed*.

The scientific and methodological basis for ensuring the standardized fire resistance of enclosing structures with glazing *has been improved*.

Practical significance of the obtained results – in the substantiation of the improved method of calculating the fire resistance of glass elements of enclosing structures under the conditions of thermal influence of the standard fire temperature mode, which allows establishing the compliance of enclosing structures with glazing to the established fire resistance class. This method has high performance and can be

part of the hierarchy of methods for assessing the fire resistance of these structures, recommended by relevant regulatory guidelines. The reference tables proposed in the work allow their use in substantiating express methods for establishing the compliance of enclosing structures with glazing with the requirements for their fire safety.

An improved method for calculating the assessment of enclosing structures with glazing was proposed and implemented in the draft state standard of Ukraine “Fire safety. Design of enclosing structures with glazing. Fire resistance. Basic provisions” when carrying out research activities at the Institute of Public Administration and Scientific Research in analyzing the fire safety of building structures and in the educational process of the National University of Civil Defense of Ukraine during the teaching of the academic discipline “Resistance of buildings and structures in case of fire”.

Research methods. To study the behavior of glazing under fire conditions, the fire test method was used. When studying the patterns of the occurrence of limit states of loss of fire resistance of glazing, the mathematical modeling method was used. To study the conditions of the occurrence of the limit state of loss of integrity of glazing, a simplified method of limiting thermal resistance of glass was used. To study the reliability and adequacy of experimental and calculated data on the behavior of glazing under the thermal effects of the standard temperature mode of fire, mathematical statistics methods were used. To construct regression dependencies on the limits of fire resistance of glazing, a full factorial numerical experiment was carried out.

The validity and reliability of scientific propositions, conclusions and recommendations are proven by the data of the analysis of scientific works in this field; the consistency of research methods with the goals and objectives set in the work; the sufficient and necessary scope of data obtained during experimental research, corresponding to standardized test methods and the use of metrologically certified equipment and verified measuring instruments; the acceptable convergence of the results of numerical and experimental research, as well as the appropriate

testing and practical implementation of the results obtained in the course of the research.

The **introduction** provides general information about the thesis, justifies the relevance of the thesis topic, formulates the goal and objectives of the thesis, defines the object and subject of the research, presents the scientific novelty and practical significance of the results obtained, shows the connection of the thesis research with state scientific programs, current areas and topics of scientific research conducted at the university, indicates the personal contribution of the applicant, presents the results of testing, publications, structure and scope of the work.

The **first chapter** presents the results of the analysis of the main methods for assessing the fire resistance of glass elements of enclosing structures and their standardization. The methods for implementing approaches to assessing the fire hazard of enclosing structures with glazing are described. The disadvantages and advantages of existing methods for assessing the fire resistance of glass elements of enclosing structures are outlined. The dependence of the behavior of glazing in fire conditions on changes in the internal structure of glass as a result of heating is revealed. Taking into account the results of the analysis, the goal and main tasks of the thesis research were formulated.

The **second chapter** substantiates mathematical models of thermal processes, stress-strain state and conditions of destruction of glass panels when they are heated under the thermal influence of the standard temperature mode of fire. Using substantiated mathematical models, calculations of temperature distributions, temperature differences on heated and unheated surfaces of glass panels, as well as characteristics of the stress-strain state in glass panels and the position of their destroyed areas were performed. The time of occurrence of destruction of a glass panel 1000x1000x4 was established by the refined method and the simplified method of ultimate thermal resistance of glass. Good convergence of these methods was shown.

The **third chapter** describes the experimental equipment for conducting fire tests of glass panels of various types under heating conditions due to the thermal

effect of the standard temperature mode of fire. Also, this chapter presents the methods of manufacturing samples and the method of installing thermocouples on them, and proposes a scheme for arranging a system for fixing thermocouples on the unheated surface of glass panel samples. The method of conducting fire tests of glass panel samples using a fire furnace with burners that form fire torches by burning diesel fuel is described. The method of processing, generalizing and interpreting temperature measurements during experiments is described.

The **fourth chapter** is devoted to the presentation of the results of fire tests of glass panel samples under the influence of a standard temperature mode of fire. By conducting fire tests, temperature data on heating of multilayer glass panels made of tempered and ordinary window silicate glass, fragments of single-chamber and double-chamber glass unit panels, as well as panels with an internal layer of thermal protective gel were obtained. The adequacy and reliability of the temperature data obtained as a result of the experiment were assessed by analyzing the statistical criteria of Cochran and Fisher. The adequacy of the obtained calculated data was also studied in comparison with the experimental data based on the average relative error, standard deviation and Fisher's criterion. The analysis showed an acceptable adequacy of the obtained results.

The **fifth chapter** presents the results of a full factorial numerical experiment, which allowed us to obtain regression dependences of the onset of loss of fire resistance of glazing on the most significant parameters of thickness and the largest overall size of glazing. Based on the obtained regression dependences, reference tables were created for the calculation assessment of fire resistance of glazing, and the corresponding nomograms were also drawn. The results obtained were used to substantiate the hierarchical structure of methods for calculating the fire resistance of glazing, which is the basis for creating a standard of Ukraine, which is a guideline for the design of fire-resistant enclosing structures with glazing.

Key words: glass, enclosing structures, fire resistance, heat flow, fire safety, computer modeling, mathematical model, calculation method.

LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE THEME OF THE DISSERTATION

Articles in scientific and professional publications of Ukraine

1. Pozdeev, Serhiy Valeriyovych, Nekora, Valeria Serhiyivna, Nekora, Olga Valeriyivna, Nizhnyk, Vadym Vasilyovych. Research on the behavior of enclosing structures with glazing under the thermal effects of fire. Bulletin of the Donetsk Mining Institute. No. 2 (53), 2023. P. 83-91. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2024-1-82-91>.

2. V. Nizhnyk, O. Savchenko, V. Nekora. Theoretical approaches to studying the regularity of the influence of fire protection systems on the level of individual fire risk. "Emergency situations: prevention and elimination", Volume 7 No. 1 (2023). P. 67-76. <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.1.67.76>

3. V.S. Nekora. Research of the conditions of destruction of glazing of enclosing structures under the thermal influence of fire. Municipal Utilities. Volume 4 No. 185 (2024): Series: Technical Sciences and Architecture. P. 178-185. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-4-185-178-185>

4. Valeria Nekora, Serhiy Pozdeev, Olga Nekora, Svitlana Fedchenko, Vadym Nizhnyk, Taras Shnal. Mathematical modeling of the behavior of a glass panel under heating conditions during a fire. Volume 8 No. 2 (2024): Collection of scientific papers of the Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine "Emergency situations: prevention and liquidation". Pp. 57-73. <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2024.8.2.57.73>

Publications in scientific publications included in the database Scopus

5. Pozdieiev, Serhiia; Nizhnyk, Vadym; Feshchuk, Yurii; Nekora, Valeriia; Nuianzin, Oleksandr; Shnal, Taras. Investigation of the influence of the configuration of the fire furnace chamber on the temperature regime during the implementation of tests for fire resistance. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2021, 4(1-112), P. 4–40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239235>

6. Feshchuk, Y., Nizhnyk, V., Nekora, V., Teslenko, O. Improving The System For Responding To Fire In Areas Contaminated By The Chernobyl Disaster. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences, 2022, 1(451), P. 152–158. <https://doi.org/10.32014/2022.2518-170X.152>.

7. Valeriia Nekora, Serhii Pozdieiev, Olga Nekora, Svitlana Fedchenko, Vadym Nizhnyk, Alina Novhorodchenko, Taras Shnal. Determining the behavior of a glass panel under heating conditions during a fire. . Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 1 No. 1 (133) (2025): Engineering technological systems. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.320431>.

List of publications, which certify the approval of the dissertation

8. Nizhnyk, V., Pozdieiev, S., Nekora, V., Teslenko, O. Substantiation of the Method for Studying the Behavior of Enclosing Structures with Glazing Under Conditions of Fire Thermal Influence. Lecture Notes in Civil Engineering, 2024, 438, P. 273–285. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_28.

9. Nizhnyk, V., Feshchuk, Y., Nekora, V., Subota, A., Shnal, T. Investigation of the temperature impact of fire through the window opening of a house with a flammable facade on elements of adjacent objects. AIP Conference Proceedings, 2023, 2684, 030031. <https://doi.org/10.1063/5.0120106>.

10. Nizhnyk, V., Savchenko, O., Ballo, Y., Nekora, V. Theoretical Approaches to Justify the Coefficients of Influence of Fire Protection Systems on Individual Fire Risk. Lecture Notes in Civil Engineering, 2023, 290 LNCE, P. 299–306. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14141-6_30.

11. Nekora, V., Sidnei, S., Shnal, T., Nekora, O. The Improvement of the Method to Determine the Temperature in Steel Reinforced Concrete Slabs in Assessment of their Fire Resistance. Materials Science Forum, 2022, 1066, P. 216–223. <https://doi.org/10.4028/p-3gvljr>.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ.....	23
ВСТУП.....	25
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СКЛЯНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	35
1.1 Статистичні дані щодо кількості випадків та наслідків пожеж у будівлях із огороджувальними конструкціями зі скляними елементами.....	35
1.2 Основні аспекти нормування вогнестійкості огороджувальних будівельних конструкцій із склінням.....	43
1.3 Сучасні підходи щодо оцінювання вогнестійкості огороджувальних будівельних конструкцій із склінням.....	48
1.3.1 Експериментальні методи оцінки вогнестійкості огороджувальних будівельних конструкцій із склінням.....	53
1.3.2 Розрахункові методи оцінки вогнестійкості огороджувальних будівельних конструкцій із склінням.....	58
1.4 Властивості скла в умовах теплового впливу пожежі.....	65
1.5 Технологія вироблення скла.....	73
1.6 Висновки до розділу.....	77
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ СКЛЯНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІД ЧАС ПОЖЕЖІ.....	80
2.1 Методика математичного моделювання поведінки скляних елементів огороджувальних конструкцій та умови їхнього руйнування під час пожежі пожежі.....	59

2.1.1 Розрахункове оцінювання класу вогнестійкості скляних елементів огорожувальних будівельних конструкцій за настанням граничного стану втрати теплоізолювальної здатності.....	84
2.1.2 Математична модель процесу теплопередачі.....	85
2.1.3 Розрахунок цілісності та несучої здатності скління в умовах пожежі.....	87
2.2 Результати обчислювального дослідження поведінки скляних елементів огорожувальних конструкцій.....	97
2.3 Висновки до розділу.....	108
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОВЕДІНКИ СКЛЯНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІД ЧАС ПОЖЕЖІ.....	
3.1 Експериментальне обладнання для здійснення досліджень.....	110
3.2 Вимоги для виготовлення зразків.....	114
3.3 Методика проведення експерименту.....	119
3.4 Методика забезпечення теплового режиму випробування зразків.....	120
3.5 Висновки до розділу.....	122
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ СКЛЯНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІД ЧАС ПОЖЕЖІ.....	
4.1 Результати експериментального вивчення теплового впливу пожежі на зразки скління.....	124
4.2 Результати експериментального вивчення теплового впливу на зразки скління.....	135
РОЗДІЛ 5. УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИВЧЕННЯ ПОВЕДІНКИ СКЛЯНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІД ЧАС ПОЖЕЖІ.....	
5.1 Розрахунковий метод оцінювання вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій	139

5.1.1	Спрощені методи.....	139
5.1.2	Уточнені методи.....	145
5.1.3	Теплова задача із врахуванням нагрівання тепловим потоком скла всередині за рахунок теплового випромінювання пожежі.....	146
5.1.4	Теплова задача із врахуванням нагрівання тепловим потоком скла всередині за рахунок теплового випромінювання пожежі у теплотехнічних характеристиках скла.....	148
5.1.5	Загальні положення щодо розв'язку задачі міцності.....	149
5.2	Розроблення національного стандарту України стосовно методі розрахункового оцінювання скляних елементів огорожувальних конструкцій.....	149
5.3	Висновки до розділу.....	151
	ВИСНОВКИ.....	153
	ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	155
Додаток А	Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	169
Додаток Б	Проект національного стандарту України.....	173
Додаток В	Акти впровадження результатів дисертації.....	175

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ

$\Delta\theta_b$ - термостійкість скла;

θ_w – температура на обігрівній поверхні одного листа або шару скління, °C;

θ_c – температура на обігрівній поверхні одного листа або шару скління, °C;

f_b – міцність скла, Па;

E_b – модуль пружності скла, Па;

μ – коефіцієнт Пуассона скла;

β – коефіцієнт терморозширення скла, °C⁻¹;

t – час перебігу пожежі, хв;

θ_0 – початкова температура середовища, °C;

$\theta_p(t)$ – температура у приміщенні із пожежею, °C;

θ_{cr} – критична температура у приміщенні із пожежею, °C;

ρ – густина скла, кг/м³;

β_a – коефіцієнт температурного об'ємного розширення повітря, °C⁻¹;

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

a_a – коефіцієнт температуропровідності скла, м²/с;

C_p – питома теплоємність скла, Дж/(м³·°C);

α – коефіцієнт теплообміну, Вт/(м²·°C);

ℓ – довжина затухання променистого теплового потоку у склі, м;

I – поглинена склом частина променистого теплового потоку, Вт/м²;

s – товщина листа скління, м;

L – товщина листа скління, м;

λ_a – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/(м·°C);

Pr – критерій подібності Прандтля;

Ra – критерій подібності Релея;

Nu – критерій подібності Нуссельта;

Gr – критерій подібності Грасгофа;

g - прискорення вільного падіння, м/с²;

d – відстань між панелями скління, м;

ν_a – кінематична в'язкість повітря;

θ_1, θ_2 – температури внутрішніх поверхонь скляних панелей скління;

Е 30 або Е 60 – клас вогнестійкості за граничним станом втрати цілісності не більше за 30 або 60 хвилин при тепловому впливі стандартного температурного режиму пожежі;

І 30 або І 60 – клас вогнестійкості за граничним станом втрати теплоізолювальної здатності не більше за 30 або 60 хвилин при тепловому впливі стандартного температурного режиму пожежі;

n – рівень навантаження колони при нормальних температурах;

t – тривалість вогневого впливу, хв;

$\gamma_{M,fi}$ – коефіцієнт надійності за матеріалом при пожежі;

η_{fi} – коефіцієнт зниження, що визначає рівень навантаження при пожежі;

μ_{fi} – коефіцієнт використання при пожежі;

θ – температура, °С.

ВСТУП

Останнім часом у будівництві інтенсифікувалося застосування скляних світлопрозорих конструкцій (СПК). Дані конструкції зараз використовуються як у якості несучих конструкцій, так і конструкцій із огорожувальними функціями. Особливого поширення скляні конструкції набули при улаштуванні фасадних систем, оскільки вони є світлопрозорими, легкі при монтажу та є важливим компонентом при прийнятті архітектурних рішень у сучасних міських забудовах. Крім цього, скляні конструкції використовують як масивні декоративні елементи інтер'єру та екстер'єру. При цьому, руйнування таких конструкцій під час пожежі становить пожежну небезпеку, оскільки сприяє поширенню пожежі і є причиною виникнення небезпечних чинників пожежі.

Відомо, що сучасна нормативна база, що є чинною і в Україні містить настанови щодо розрахункових методів для оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій. Ці нормативні документи повністю відповідають другим частинам настанов с проектування будівельних конструкцій, тобто Єврокодів. Водночас, дані норми не містять таких настанов для оцінки вогнестійкості СПК.

В роботах Демчини Б.Г., Шналя Т.М., Поздєєва С.В., Ніжника В.В., Семерака М.М., Белікова А.С., Ватулі Г.Л., Фоміна С.Л., Круковського П.Г., Харченка І.О., Нуянзіна О.М., T. Lie, B. Barteleml, G. Kruppa, T. Harmathу та ін. наведено основні підходи щодо оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій. Аналіз зазначених робіт показав, що серед причин нещасних випадків вагоме місце займає падіння, обвалення, обрушення конструкцій та матеріалів, а також дія предметів, що розлітаються. Всі перелічені чинники мають місце при настанні аварійного стану елементів будівельних конструкцій із скла у результаті нагріву при пожежі. Найбільшу небезпеку при цьому становлять у тому числі скляні елементи будівельних огорожувальних конструкцій, оскільки часто вони є частиною протипожежних перешкод. Їх обвалення є особливо небезпечним при евакуації людей та роботі аварійно-рятувальних підрозділів. Зокрема у роботах Демчини Б.Г., Шналя Т.М., Поздєєва С.В.,

Ніжника В.В., Дмитриченко А.С. Bedon C., Pagni P.J., Levine, R.S., Chen H., Zhao H. та ін. показано основні підходи до оцінювання вогнестійкості скляних конструкцій.

Розкриття закономірностей зміни параметрів теплових процесів та напружено-деформованого стану у скляних елементах огорожувальних конструкцій у результаті теплового впливу пожежі є актуальним науково-технічним завданням, розв'язання якого дозволяє створити наукове підґрунтя для удосконалення методів розрахункового оцінювання вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій. Наявність таких удосконалених методів може бути передумовою щодо забезпечення відповідності огорожувальних конструкцій із світлопрозорими конструкціями необхідним класам вогнестійкості і як результат цього підвищення рівня пожежної безпеки будівель та споруд у цілому.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертація виконана в межах, окреслених розпорядженням Кабінету Міністрів України від 19.08.2015 № 844-р «Про схвалення Стратегії розвитку системи технічного регулювання на період до 2020 року», пріоритетних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України на 2020-2024 роки, відповідно до «Плану наукової і науково-технічної діяльності ДСНС України на 2022 рік», а також розділу 2, п. 11 «Плану наукової і науково-технічної діяльності Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України на 2022 рік». Дослідження було виконано у рамках науково-дослідної роботи РК № 0122U200795 «Обґрунтування метода розрахункової оцінки вогнестійкості огорожувальних конструкцій зі скляними елементами», де здобувач була виконавцем.

Об'єкт досліджень – процеси теплообміну деформування та руйнування скляних елементів огорожувальних конструкцій при тепловому впливі пожежі.

Предмет досліджень – вплив конструктивних характеристик скляних елементів огорожувальних будівельних конструкцій на прогнозовані параметри часу фіксації граничних станів втрати вогнестійкості скляних елементів при тепловому впливі пожежі.

Метою роботи є розкриття закономірностей змінення параметрів теплових процесів та напружено-деформованого стану у скляних елементах огорожувальних конструкцій в умовах теплового впливу пожежі як наукового підґрунтя для удосконалення стандартизованих методів розрахункового оцінювання їх вогнестійкості.

Задачі досліджень. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести аналіз статистичних відомостей щодо пожеж в Україні за останні роки, а також провести аналіз нормативної бази України та інших країн у галузі нормування вимог щодо вогнестійкості огорожувальних конструкцій із склінням.
2. Обґрунтувати математичну модель поведінки скляних елементів огорожувальних конструкцій в умовах нагрівання під тепловим впливом пожежі та визначити на її основі температурні режими нагрівання та умови руйнування даних скляних елементів
3. Розробити методику та провести вогневі випробування зразків скляних елементів огорожувальних конструкцій з метою дослідження їхніх температурних та деформаційних показників при тепловому впливі стандартного температурного режиму пожежі;
4. На основі отриманих експериментальних даних дослідити адекватність розрахункових даних шляхом їхнього порівняння із одержаними експериментальними даними;
5. Шляхом проведення повного факторного експерименту виявити закономірності залежності межі вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій від їхніх конструктивних параметрів і на їх

основі обґрунтувати удосконалений метод оцінювання вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій.

Наукова новизна отриманих даних у ході проведення досліджень у рамках виконання дисертаційної роботи полягає у розкритті закономірностей залежностей часу настання граничних станів втрати вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій внаслідок розтіскування та руйнування скла за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі. Встановлені закономірності є науковим підґрунтям для удосконалення методу розрахункового оцінювання вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій. При цьому вперше:

- виявлено закономірності зміни часу втрати вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій залежно від їхньої товщини (h) та найбільшого габаритного розміру (l), що наближені за допомогою регресійних залежностей і які мають вигляд:

одношарове скло із відношенням сторін, що дорівнює 1.5, $U_e = 22.28125 - 2.203125h - 1.6875l + 0.21875 \cdot h \cdot l$;

одношарове скло із відношенням сторін, що дорівнює 2, $U_e = 20.7625 - 0.94375h - 1.775l + 0.2625 \cdot h \cdot l$;

однокамерний склопакет із відношенням сторін, що дорівнює 1.5, $U_e = 19.90625 - 1.890625 h - 0.9375 l + 0.09375 \cdot h \cdot l$;

однокамерний склопакет із відношенням сторін, що дорівнює 2, $U_e = 21.525 - 2.16875 h - 1.55 l + 0.2125 \cdot h \cdot l$;

двокамерний склопакет із відношенням сторін, що дорівнює 1.5, $U_e = 20.91875 - 1.740625 h - 0.6125 l + 0.00625 \cdot h \cdot l$;

двокамерний склопакет із відношенням сторін, що дорівнює 2, $U_e = 19.325 - 1.44375 h - 0.65 l + 0.0125 \cdot h \cdot l$.

- з урахуванням виявлених закономірностей запропоновано довідникові таблиці щодо встановлення вогнестійкості скляних елементів огорожувальних

конструкцій залежно від товщини та найбільшого габаритного розміру скляних панелей.

Набули подальшого розвитку спрощені стандартизовані методи розрахункового оцінювання вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій за допомогою запропонованих довідникових таблиць.

Удосконалено науково-методичну базу для забезпечення відповідності скляних елементів огорожувальних конструкцій нормативним вимогам щодо їхньої вогнестійкості.

Практичне значення отриманих результатів полягає в обґрунтуванні удосконаленого методу розрахункового оцінювання вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій при тепловому впливі пожежі із стандартним температурним режимом, що дозволяє визначити відповідність скляних елементів огорожувальних конструкцій встановленому класу вогнестійкості. Даний метод має високу продуктивність і може бути частиною ієрархії методів оцінювання вогнестійкості даних конструкцій, що пропонується використовувати як базові відповідними нормативними настановами. Запропоновані у роботі довідникові таблиці дозволяють їхнє використання при обґрунтуванні експрес-методів встановлення відповідності огорожувальних конструкцій із склінням вимогам щодо їхньої пожежної безпеки.

Запропонований удосконалений метод розрахункового оцінювання огорожувальних конструкцій із склінням впроваджено до проекту державного стандарту України «Пожежна безпека. Проектування огорожувальних конструкцій із склінням. Вогнестійкість. Основні положення» при здійсненні науково-дослідної діяльності в Інституті державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту при аналізі пожежної безпеки будівельних конструкцій, у навчальний процес Національного університету цивільного захисту України під час викладання навчальної дисципліни «Пожежна безпека будівель та споруд» та практичну діяльність приватного підприємства «ПроектБудСтар» шляхом використання методик оцінювання вогнестійкості

огороджувальних конструкцій із скляними елементами при аналізі пожежної безпеки об'єктів будівництва.

Методи дослідження. Для досліджень процесів при нагріванні скляних елементів огороджувальних конструкцій під час пожежі застосований метод вогневих випробувань. При дослідженнях закономірностей часу настання граничних станів втрати вогнестійкості скляних елементів огороджувальних конструкцій був використаний метод математичного моделювання. Дослідження умов руйнування скляних елементів огороджувальних конструкцій застосований спрощений метод граничної термостійкості скла. Для дослідження достовірності та адекватності отриманих характеристик поведінки скляних елементів огороджувальних конструкцій під час пожежі, визначених експериментальним та розрахунковим шляхом, застосовані методи перевірки статистичних гіпотез. Для побудування регресійних залежностей щодо меж вогнестійкості скляних елементів огороджувальних конструкцій було здійснено повний факторний обчислювальний експеримент.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій доводиться результатами аналізу наукових праць даної галузі; узгодженістю методів дослідження із поставленими в роботі метою і завданнями; достатнім та необхідним обсягом отриманих результатів вимірювань під час здійснення експериментів, умови яких відповідають стандартизованим методикам вогневих випробувань і застосуванні метрологічно атестованого випробувального та вимірювального обладнання; прийнятною збіжністю результатів розрахунку та експериментальних досліджень, а також достатньою апробацією та практичним впровадженням одержаних результатів під час виконаних досліджень.

Особистий внесок здобувача полягає в проведенні літературного огляду де наведений аналіз сучасного стану нормування та наукових досліджень щодо вогнестійкості скляних елементів огороджувальних конструкцій, формулюванні ідеї роботи, формулюванні мети і завдач досліджень, визнаення об'єкту та предмету досліджень; обґрунтуванні методики проведення експериментальних

досліджень; здійснення експериментальних досліджень теплового впливу пожежі на скляні світлопрозорі елементи, обробці отриманих експериментальних даних, обґрунтуванні математичних моделей теплопередачі та теплообміну у склінні, обґрунтуванні математичної моделі для описання напружено-деформованого стану та руйнуванні скляної панелі за умов теплового впливу пожежі. Проведені числового повного факторного експерименту із побудуванням регресійних залежностей межі вогнестійкості скління від його конструктивних параметрів.

Особистий внесок здобувача у роботах де містяться результати наукових досліджень за темою дисертації, опублікованих у співавторстві, викладено нижче:

- у статті [Pozdieiev, Serhii; Nizhnyk, Vadym; Feshchuk, Yurii; **Nekora, Valeriia**; Nuianzin, Oleksandr; Shnal, Taras. Investigation of the influence of the configuration of the fire furnace chamber on the temperature regime during the implementation of tests for fire resistance. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2021, 4(1-112), P. 4–40] здобувач виконав літературний огляд щодо впливу конфігурації вогневої печі на рівномірність розподілення температури вздовж огорожувальної конструкції, що у свою чергу впливає на достовірність досліджень вогнестійкості скління в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі;

- у статті [Feshchuk, Y., Nizhnyk, V., **Nekora, V.**, Teslenko, O. Improving The System For Responding To Fire In Areas Contaminated By The Chernobyl Disaster. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences, 2022, 1(451), P. 152–158] здобувач розробив методику теоретичних досліджень поведінки огорожувальних конструкцій в умовах пожеж при їх виникненні у внутрішньому просторі будівель Чорнобильської атомної станції.

- у статті [Поздеев, Сергій Валерійович, **Некора, Валерія Сергіївна**, Некора, Ольга Валеріївна, Ніжник, Вадим Васильович. Дослідження поведінки огорожувальних конструкцій із склінням в умовах теплового впливу вогню.

Вісті Донецького гірничого інституту. №2 (53), 2023. Р. 83-91] здобувач узагальнив та проаналізував експериментальні дані, отримані в ході проведення вогневих випробувань скляних елементів в умовах впливу теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі, виявив основні закономірності температурних розподілів по товщині скляних панелей, а також встановив закономірності нагрівання скляних елементів у даних умовах.

- у статті [В. Ніжник, О. Савченко, **В. Некора**. Теоретичні підходи для дослідження закономірності впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику. «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація», Том 7 № 1 (2023). С. 67-76] здобувач обґрунтував методологію прогнозування пожежної безпеки огорожувальних конструкцій у тому числі із склінням з точки зору ризик-орієнтованого підходу;

- у статті [**Valeriia Nekora**, Serhii Pozdieiev, Olga Nekora, Svitlana Fedchenko, Vadym Nizhnyk, Alina Novhorodchenko, Taras Shnal. Determining the behavior of a glass panel under heating conditions during a fire. . Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 1 No. 1 (133) (2025): Engineering technological systems] здобувач обґрунтував математичну модель поведінки скляних панелей в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі та провів відповідні розрахунки;

- у статті [**Валерія Некора**, Сергій Поздєєв, Ольга Некора, Світлана Федченко, Вадим Ніжник, Тарас Шналь. Математичне моделювання поведінки скляної панелі в умовах нагріву при пожежі. Том 8 № 2 (2024): Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація». С. 57-73] здобувач обґрунтував методику розрахунку за запропонованою математичною моделлю поведінки скляних панелей в умовах нагрівання за стандартним температурним режимом пожежі та виконав відповідні розрахунки;

- у статті [Nizhnyk, V., Pozdieiev, S., **Nekora, V.**, Teslenko, O. Substantiation of the Method for Studying the Behavior of Enclosing Structures with Glazing Under

Conditions of Fire Thermal Influence. Lecture Notes in Civil Engineering, 2024, 438, P. 273–285] здобувач обґрунтував методику проведення теоретичних та експериментальних досліджень поведінки скління в умовах нагрівання при пожежі, а також оцінки адекватності отриманих результатів.

у статті [Nizhnyk, V., Feshchuk, Y., **Nekora, V.**, Subota, A., Shnal, T. Investigation of the temperature impact of fire through the window opening of a house with a flammable facade on elements of adjacent objects. AIP Conference Proceedings, 2023, 2684, 030031] здобувач провів аналіз щодо можливості врахування вогнестійкості скління фасадних систем у зв'язку із поширенням пожежі через них на суміжні поверхи;

у статті [Nizhnyk, V., Savchenko, O., Ballo, Y., **Nekora, V.** Theoretical Approaches to Justify the Coefficients of Influence of Fire Protection Systems on Individual Fire Risk. Lecture Notes in Civil Engineering, 2023, 290 LNCE, P. 299–306] здобувач обґрунтував методику аналізу пожежної безпеки огорожувальних конструкцій у тому числі із склінням з точки зору ризик-орієнтованого підходу;

у статті [**Nekora, V.**, Sidnei, S., Shnal, T., Nekora, O. The Improvement of the Method to Determine the Temperature in Steel Reinforced Concrete Slabs in Assessment of their Fire Resistance. Materials Science Forum, 2022, 1066, P. 216–223] здобувач обґрунтував методику розв'язку теплової задачі залізобетонних панелей в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Апробація результатів дисертації. Основні результати виконаних досліджень було оприлюднено, обговорено та позитивно оцінено на всеукраїнських, міжнародних наукових конференціях, а саме:

– 18th International Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv (Rzeszów, Poland 2024 p.);

– 9th International Scientific Conference on Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings, TransBud 2021 (м. Харків, 2021 p.);

– XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист (м. Черкаси, 2024 р.);

– XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист (м. Черкаси, 2023 р.);

Публікації. Основні аспекти отриманих у роботі наукових результатів наведено в 5.5 наукових статтях наукових збірників, що належать до переліку фахових, в тому числі в 3 статтях у виданнях, що індексуються у наукометричній базі Scopus. Основні отримані дані досліджень також викладено у 4 доповідях на вітчизняних та іноземних наукових конференціях.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота містить у собі вступ, 5 розділів, висновки, список використаних літературних джерел, що включає 144 найменування, має 178 сторінок друкованого тексту, 60 рисунків, 30 таблиць та 3 додатки.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СКЛЯНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

1.1. Статистичні дані щодо кількості випадків та наслідків пожеж у будівлях із огороджувальними конструкціями зі скляними елементами

Конструкції де застосовуються скляні світлопрозорі елементи застосовуються для реалізації архітектурних рішень для надання будівлям зовнішнього вигляду відповідного сучасній естетиці та тенденціям сучасного художнього мистецтва. Крім цього, такі конструкції дозволяють підвищити комфорт будівель, оскільки протяжна площа фасадів дозволяє проникнення всередину приміщень максимуму природного освітлення, що робить приміщення вільнішими і просторішими. У даний час мають своє застосування різні види і типи скла, що відрізняються своїми мехнічними, світо пропускними та декоративними властивостями. Фасадні системи із скляним огородженням застосовується при впровадженні архітектурних рішень переважно для облаштування будівель торгівельно-розважального функціонального призначення (торгівельні та розважальні центри і комплекси, офісно-торгівельні комплекси, багатофункціональні комплекси, тощо); будівель адміністративного призначення, в тому числі вокзалів і службових об'єктів і інших подібних будівельних об'єктів. В цілому скляні елементи конструкцій є універсальним рішенням для улаштування фасдних систем, ситем внутрішнього оздоблення інтер'єру, зовнішнього оздоблення і реклами, що може реалізовувати багато сучасних архітектурних стилей.

Вогнестійкість скляних елементів огороджувальних конструкцій, зокрема віконних систем, донедавна не враховувалася при проведенні аналізу пожежної безпеки даної будівлі. Причиною даного підходу була обставина, що площа скляних елементів конструкцій була порівняно незначною, і не мала суттєвого

значення при розгляді умов поширення пожежі або евакуації людей. Із часом ситуація змінилася і скляні елементи конструкції набули набагато більшої протяжності і площі. Прикладом цього можуть бути офісні перегородки, огороження фасадів сучасних будівель, інтер'єрні та екстер'єрні архітектурні елементи, включаючи конструкції для рекламних цілей, тощо. Це зумовлює актуалізацію питання необхідності забезпечити відповідний рівень пожежної безпеки даних конструкцій. Скло крихко руйнується під впливом нагріву до високих температур під час пожежі, що спричиняє швидке надходження кисню до осередку пожежі і сприяє її подальшому поширенню.

Пожежа може поширюватися на інші поверхи зовнішнім шляхом через отвори, які утворюються у скляному фасаді внаслідок руйнування скла під впливом високих температур, та охоплювати внутрішній простір приміщення іншого поверху.

Вивчення статистичних даних про пожежі в будівлях із будівельними конструкціями із використанням скляних елементів був здійснений виходячи з можливостей програмного забезпечення «Статистичний облік пожеж», розробленого у відповідності до вимог наказу ДСНС від 16.08.2017 № 445 «Про забезпечення ведення обліку пожеж та їх наслідків».

Проведення даного аналізу здійснено за наступними критеріями вибірки з масиву карток обліку пожеж:

- Період. Для визначення тенденцій, які притаманні виникненню та розвитку пожеж, виявленню динаміки характеризуючи змін, періодом вибірки визначено останні 6 років, а саме: з 2018 року по 2023 рік;
- Місце виникнення або початкового поширення пожежі. З масиву карток обліку пожеж у текстовому форматі визначеного часового періоду обирались відомості про пожежі, що виникали на зовнішніх фасадах будівельних об'єктів, або набули подальше поширення на елементи зовнішнього облицювання цих об'єктів.

- З результатів пошуку вилучені пожежі, місцем виникнення яких були балкони багатоквартирних житлових будинків старої забудови. Також з результатів пошуку вилучені окремі факти пожеж, що мали місце в одноповерхових допоміжних спорудах приватної житлової забудови.

Застосування зазначених критеріїв вибірки вказує, що у 2023 році виникло 92 таких пожежі, що складає 12,6 % від кількості пожеж, що набули поширення за межі приміщення, в якому вони виникли, в будівлях з несучими та огорожувальними кам'яними, залізобетонними конструкціями для випадків відсутності вогнетривких матеріалів для протипожежного захисту дерев'яних конструкцій (загалом 968 таких випадків).

Ранжування кількості пожеж в будівлях із будівельними конструкціями із використанням скляних елементів по рокам має наступний вигляд: 2018 рік – 52 пожежі; 2019 – 54; 2020 – 82; 2021 – 105; 2022 – 180, 2023 – 92.

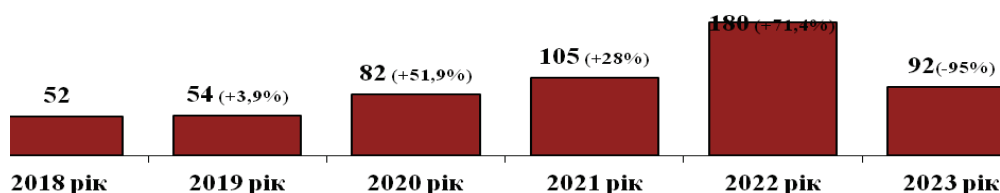


Рис. 1.1 – Ранжування кількості пожеж в будівлях із будівельними конструкціями із використанням скляних елементів по рокам у порівнянні з показниками минулого року.

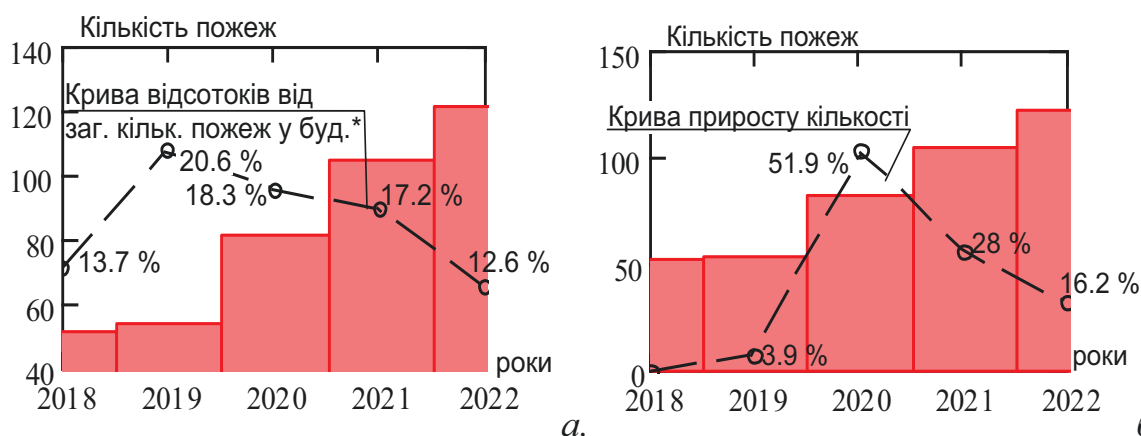


Рис. 1.2 – Графіки кривої приросту кількості пожеж відносно 2018-2023 років в будівлях із будівельними конструкціями із використанням скляних елементів (а) і кривої відсотків від загальної кількості пожеж в будівлях із будівельними конструкціями із використанням скляних елементів (б).

Рис. 1.1 та Рис. 1.2 засвідчують актуальність питання і визначають, що динаміка кількості пожеж в будівлях із будівельними конструкціями із використанням скляних елементів по рокам, спрямована на поступове зростання зазначеного показника.

Основні статистичні показники, які характеризують кількісні показники поточного стану щодо пожеж в будівлях із будівельними конструкціями із використанням скляних елементів, зведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Кількісні показники статистики щодо стану з пожежами в будівлях із будівельними конструкціями зі скляними елементами

№ з/п	Назва показників	2023 рік	2022 рік	2021 рік	2020 рік	2019 рік	2018 рік
Загальні дані щодо випадків пожеж							
1	Число пожеж	92	180	105	82	54	52
2	Прямі збитки (тисяч грн.)	123579	106395	13055	5484	2931	553
3	Непрямі збитки (тисяч грн.)	173508	118128	21669	14600	7328	2835
4	Летальних випадків унаслідок пожеж	8	8	3	0	0	0
•	у тому числі діти та підлітки до 18 років	0	0	0	0	0	0
5	Число травмованих людей на пожежах	9	40	2	2	1	0
•	у тому числі діти та підлітки до 18 років	1	2	0	0	0	0
6	Кількість будівель і споруд, що знищено або пошкоджено	69	202	54	41	25	25
Дані щодо пожеж на окремих типах будівель							
7	Число пожеж на об'єктах, з них:	25	19	20	22	18	16
•	Виробничі будівлі	3	2	2	3	0	1
•	Будівлі об'єктів торговельного та харчовального призначення	10	5	8	16	12	11
•	Будівлі сервісів побутового обслуговування населення	0	1	2	1	1	0
•	Освітні та дошкільні заклади навчання	0	1	0	1	0	0
•	Заклади для охорони здоров'я населення та відпочинку	2	3	4	0	0	1
•	Будівлі соціально-культурного, громадського та адміністративного призначення	10	4	4	1	5	3
8	Житлові будівлі	64	158	80	54	36	35
9	Інші об'єкти	3	3	5	6	0	1

Продовження табл. 1.1

Причини виникнення пожеж							
10	Підпал	2	2	14	14	7	11
11	Несправність виробничого обладнання	3	1	2	2	0	1
12	Порушення правил пожежної безпеки при влаштуванні та експлуатації електроустановок	39	46	56	32	19	16
13	Необережне поводження з вогнем	20	16	13	23	17	9
15	Інші причини	4	10	20	11	11	15

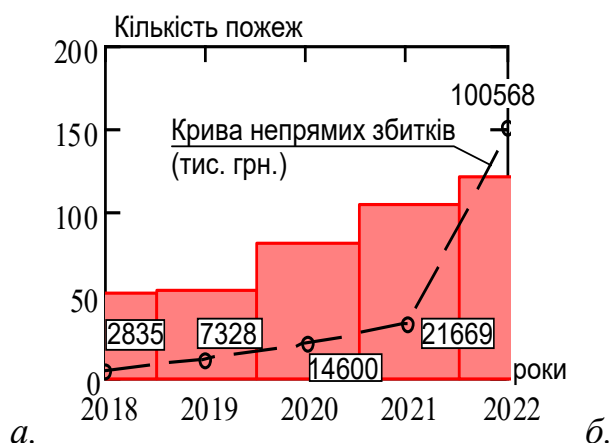


Рис. 1.3 – Графіки кривої прямих збитків через пожежі в будівлях із будівельними конструкціями із використанням скляних елементів (а) і кривої непрямих збитків через пожежі в будівлях із будівельними конструкціями із використанням скляних елементів (б) у 2018-2023 роках.

Дані табл 1.1 та рис. 1.3 крім динаміки кількості пожеж впродовж останніх років, спрямованої на зростання їх кількості вказують на наступні характеристики перербігу пожеж та їхніх наслідків у будівлях, де використовуються будівельні конструкції із скляними елементами.

У визначеному часовому діапазоні фіксується зростання матеріальних втрат від пожеж (суми прямих та побічних збитків). Незважаючи на наявність актуальних питань, пов'язаних з порядком розрахунку прямих збитків унаслідок пожеж, за останні 9 місяців 2022 року порівняно із таким же самим періодом 2018 року збитки збільшилися у 3,15 рази.

Непрямі збитки внаслідок пожеж також неухильно збільшуються. При цьому переважну частину цих збитків становлять витрати держави на організацію заходів щодо забезпечення необхідного рівня пожежної безпеки та гасіння пожеж.

Кількість летальних випадків на пожежах також має тенденцію на збільшення. Однак об'єктивно оцінювати зростання у 2,6 рази кількості загиблих у 2022 році у порівнянні із кількісними даними 2021 року не має сенсу, оскільки загибель 6 з них відбулась на пожежах, причиною яких став вибух. При цьому, показник числа випадків загибелі людей протягом 9 місяців 2022 року вже перебуває на рівні річного показника 2021 року.

Аналогічно, зростання кількості травмованих унаслідок пожеж у 2022 році було пов'язано із збройною агресією російської федерації проти України.

Випадків загибелі чи травмування дітей унаслідок пожеж у будівлях із будівельними конструкціями із використанням скляних елементів з 2018 по 2023 роки не було зафіксовано.

Також небезпечним фактором пожеж в будівлях із будівельними конструкціями із використанням скляних елементів є руйнація скляних фасадних елементів із подальшим поширенням пожежі по фасаду і на суміжні будівлі, як це показано на рисунку 4 (б), де при 122 пожежах в 2022 році пошкоджено 169 будівель, що свідчить про те, що в 47 випадках пожежа перекидалась на суміжні будівлі.

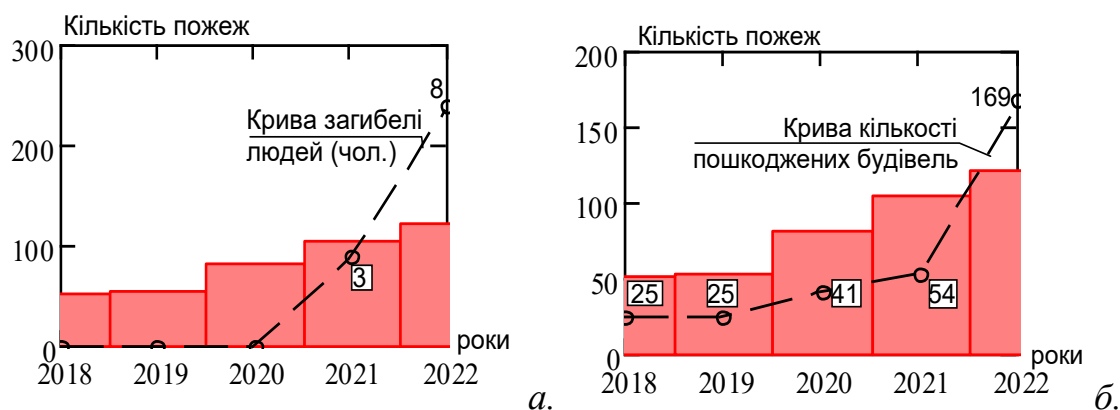


Рис. 1.4 – Графіки кривої прямих збитків через пожежі в будівлях із будівельними конструкціями із використанням скляних елементів (а) і кривої

непрямих збитків через пожежі в будівлях із будівельними конструкціями із використанням скляних елементів (б) у 2018-2023 роках.

Розподіл пожеж за об'єктами їх виникнення визначає 2 основні групи таких об'єктів: будівлі житлового призначення та об'єкти суб'єктів господарювання. Пожежі на фасадах будівель житлового призначення здебільшого обумовлені можливістю поширення полум'я на ділянках огорожувальних конструкцій, що являють собою комбінацію горючих облицювань будівель та будівельних конструкцій із використанням скляних елементів, виконану при здійсненні конструктивних рішень на етапі будівництва. Розподіл середніх показників кількості пожеж, які виникли впродовж 2018 - 2023 років на об'єктах суб'єктів господарювання зведені в рисунок 5.

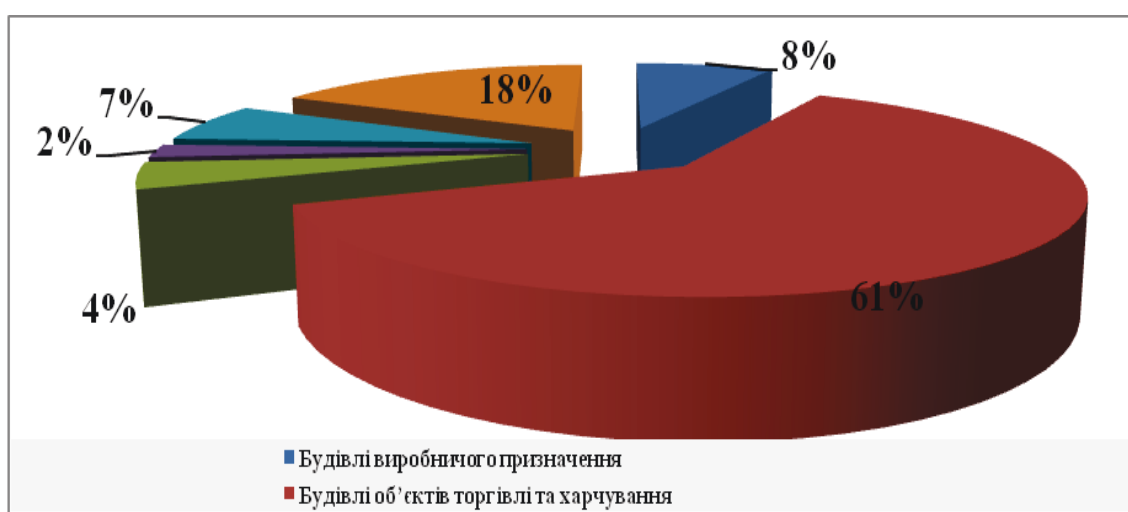


Рис. 1.5 – Розподіл середніх показників кількості пожеж, які виникли у будівлях і спорудах суб'єктів господарювання впродовж 2018 - 2023 років в залежності від груп об'єктів виникнення пожеж.

З рис. 1.5 видно, що 61% пожеж на фасадах будівель із будівельними конструкціями із використанням скляних елементів на об'єктах суб'єктів господарювання виникає в будівлях торговельних та харчовальних об'єктів.

Розподілення середніх показників числа пожеж залежно від причин їх виникнення подані на рис. 1.6.

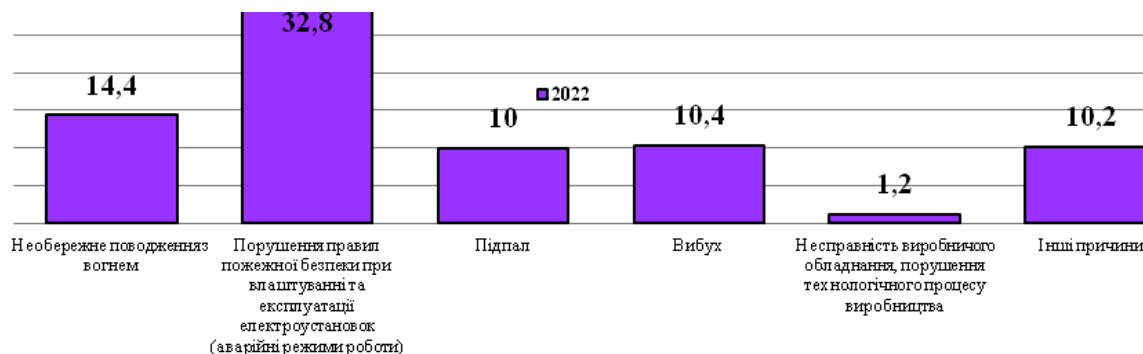


Рис. 1.6 – Розподіл середніх показників числа пожеж залежно від причин їх виникнення у 2018 - 2023 роках.

Дані на рис. 1.6 наглядно свідчать, що причиною виникнення 39,5% пожеж а фасадах будівель із будівельними конструкціями із використанням скляних елементів було невиконання правил пожежної безпеки при монтажу та експлуатуванні електричних установок. Даний висновок можна зробити враховуючи, що саме на фасадах будівель розташовуються елементи зовнішньої реклами, блоки кондиціонерів, приточно-витяжної вентиляції та інших електричних устаткувань.

Дані, подані на рис. 1.7 підтверджує, що пожежі у будівлях із будівельними конструкціями із використанням скляних елементів виникають на всій території держави, їх рівень в першу чергу пов'язаний з рівнем промислової, торгівельної та житлової забудови населених пунктів.

Кількість пожеж, які було зафіксовано за останні 5 років у будівлях із будівельними конструкціями із використанням скляних елементів, є більшою за середню величину даного показника загалом по державі в 9 областях України та місті Києві (див. рис. 1.7).

конструкцій. На рис. 1.8 наведена структурна схема нормативної бази, що регламентує основні аспекти у галузі вогнестійкості будівельних конструкцій [1 – 36].

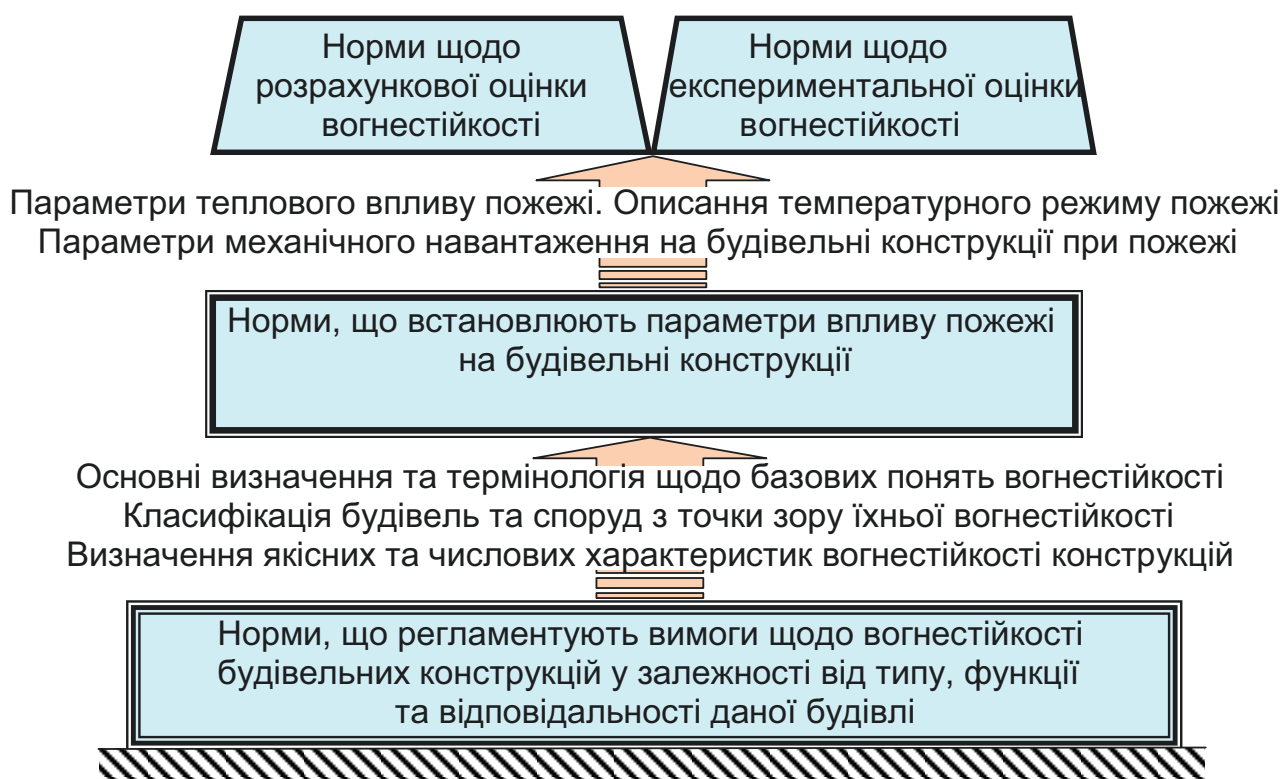


Рис. 1.8 - Ієрархічна структура регламентних норм щодо вогнестійкості будівельних конструкцій.

З рис. 1.8 видно, що нормативна база має свою ієрархію, яка у своїй основі має міжнародні стандарти, які визначають базовий підхід до встановлення кількісних параметрів і встановлюють узагальнені методи схематизації впливу пожежі на будівельні конструкції.

Базові нормативні документи [1 – 9] дають рекомендації щодо встановлення необхідних вимог щодо вогнестійкості із врахуванням функціонального призначення, архітектурні та конструктивні особливості, відповідальність та інші особливості даної будівлі. Для цього вводиться система основних означень, термінології та кількісних характеристик щодо вогнестійкості будівельних конструкцій. Крім цього, вводяться ознаки та критерії, що встановлюють стан втрати будівельними конструкціями своїх

кондицій, які пов'язані із умовами збереження їх вогнестійкості. На базі даних документів створена ієрархічна ланка нормативних документів [8 – 10], що встановлюють параметри впливу пожежі на будівельні конструкції, зокрема тепловий вплив пожежі та рівень механічних навантажень на будівельні конструкції під час пожежі.

Нормативні документи третьої ієрархічної ланки [11 – 36] містять рекомендації щодо проведення оцінки вогнестійкості за параметрами, встановленим базовими нормами. При цьому використовують два типи принципово різних методів оцінки – розрахункового та експериментального, що визначають розділення даних нормативних документів на відповідні групи.

На рис. 1.9 наведена структура нормативної бази, яка є чинною в Україні.

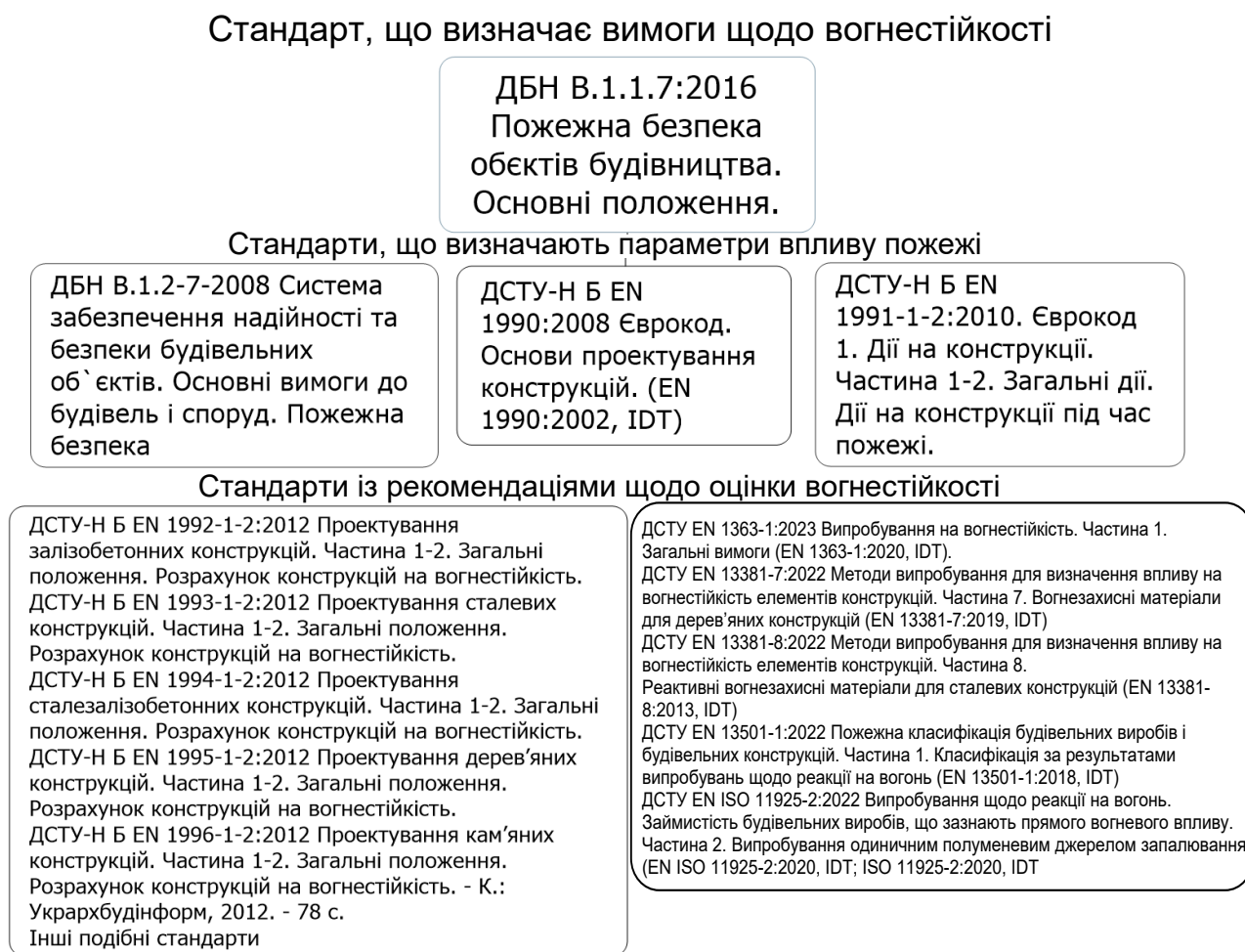


Рис. 1.9 - Система стандартів, які визначають основні регламентні норми щодо вогнестійкості в Україні.

Структурна схема на рис. 1.9 показує, що ієрархія нормативних документів, чинних в Україні зберігає порядок, що відображає схема на рис. 1.8. Крім цього, основні нормативні документи або використовують світові та європейські стандарти в якості їхньої основи, або дані документи є імплементовані у структуру норм України, що стосуються вимог пожежної безпеки будівельних об'єктів.

Реалізація технічних рішень щодо пожежної безпеки відбувається на стадії проектування і зведення об'єктів різних типів, зокрема підприємств та закладів громадського харчування і торгівлі, складських та допоміжних будівель. За таких умов важливе значення для зниження небезпеки виникнення і поширення пожеж має вдалий вибір будівельних матеріалів для зведення конструкцій.

Вогнестійкість будівельних конструкцій визначається як їх здатність зберігати несучу здатність та захисні функції під час виникнення та переробігу пожежі. Межа вогнестійкості будівельної конструкції визначається як час (у хвилинах від початку виникнення пожежі до появи однієї з наступних ознак настання одного з граничних станів [7 – 10]:

- а) виникнення у конструкції наскрізних дефектів та тріщин;
- б) досягнення температури на необігрітій поверхні елемента конструкції, в середньому більш ніж на 140°C , або фіксування в будь-якій точці цієї поверхні температури більше на 180°C початкової температури елемента конструкції до виникнення пожежі;
- в) втрата елементом конструкції своєї несучої здатності.

Залежно від границі поширення полум'я та межі вогнестійкості наявних будівельних конструкцій встановлюється ступінь вогнестійкості будівельних об'єктів. Всі будівельні об'єкти за вимогами щодо вогнестійкості розділяються на вісім ступенів вогнестійкості: I, II, III, IIIa, IIIб, IV, IVa, V [7].

Найбільш жорсткі вимоги щодо меж вогнестійкості для елементів будівельних конструкцій висуваються до будівель із I-м ступенем

вогнестійкості; у будівлях із кожним наступним ступенем вогнестійкості вимоги знижуються.

При нормуванні класів вогнестійкості елементів будівельних конструкцій, що безпосередньо працюють як частина структури будівлі, виконуючи тільки несучу функцію, застосовують тільки літерне позначення R для граничного стану втрати несучої здатності для елементів, якими є колони, балки, ферми, арки, рами. Для елементів конструкцій, пристосованих тільки для здійснення огорожувальних функцій, використовується літерне позначення настання граничного стану втрати цілісності E, та теплоізолювальної здатності I. Такі умови можуть бути висунуті для елементів якими є зовнішні ненесучі стіни, внутрішні ненесучі стіни та перегородки.

У стандарті [36] наведено означення для світлопрозорих огорожень, як елементів конструкції зовнішніх стін із наявною фасадною теплоізоляцією і облицюванням з використанням прозорих елементів. Тобто їх можна описати як конструктивні рішення для улаштування зовнішніх стін із суцільним світлопрозорим або комбінованим фасадом з облицюванням світлопрозорими елементами. При цьому, фасадна система може бути частково прозорою, але ззовні мати вигляд скляної суцільної конструкції.

Такі фасадні системи з використанням світлопрозорих елементів для зовнішнього облицювання включають власне прозорі елементи (скло, склопакети), несучий каркас, виготовлений із стійок, ригелів, кріпильних непрозорих елементів, і розділяються на суцільні світлопрозорі фасадні системи, в яких захищені грубою теплоізоляцією тільки елементи перекриття, та комбіновані фасадні системи, що включають прозорі та непрозорі ділянки.

Типи конструктивних рішень та технологічні аспекти зведення світлопрозорих конструкцій фасадних систем визначають їх поділ на стійково-ригельні; із структурним і напівструктурним склінням; із спайдерним склінням та подвійні фасадні системи.

Заповнення прорізів на непрозорих ділянках здійснюється за допомогою дво- або тришарових панелей з металевою обшивкою, мінераловатними або скловатними плитами, розміщеними зовні поверхні стіни.

Основним документом, що регламентує вимоги до теплоізоляції огорожувальних конструкцій та загальні вимоги щодо енергоефективності будівлі, є [25].

Однією з головних вимог до огорожувальних конструкцій, що встановлена у ДБН В.2.6-31:2006, є забезпечення необхідних параметрів приведенного опору теплопередачі елевних елементів зовнішнього огородження будівель:

$$R_{\Sigma \text{пр}} \geq R_{q \text{ min}}. \quad (1.1)$$

Тут $R_{\Sigma \text{пр}}$ – приведений опір поширення тепла даних елементів зовнішнього огородження будівель, $\text{м}^2\text{°C/Вт}$;

$R_{q \text{ min}}$ – мінімальна допустима величина опору поширення тепла, $\text{м}^2\text{°C/Вт}$.

1.3. Сучасні підходи щодо оцінювання вогнестійкості огорожувальних будівельних конструкцій із склінням

Повсюдно визнаним є те, що найбільш деструктивним фактором щодо будівельних конструкцій в умовах пожежі є тепловий вплив [1-60]. Відомо, що при пожежі може бути досягнуті високі величини температур до 1000 °C і більше. Для багатьох конструктивних будівельних матеріалів, включаючи залізобетон, високі температури нагріву приводить до необоротних змін у внутрішній структурі залізобетону, які дуже сильно послаблюють його опір до діючих навантажень. При цьому унаслідок утворення великої кількості дефектів та тріщин порушується виконання огорожувальних функцій залізобетонними будівельними конструкціями. Тож з викладеного випливає досить очевидний висновок, що величина та характер зміни температури у приміщенні із

пожежею є основним чинником, орієнтуючись на який, можна прогнозувати вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій.

Велика різноманітність архітектурно-конструктивних рішень, функціонального призначення та типу будівельних об'єктів визначає таку ж саму різноманітність перебігу пожеж у внутрішніх приміщеннях цих об'єктів та назовні. Зрозуміло, що для прогнозування температурних показників пожежі у конкретному випадку потрібно врахувати багато особливостей та факторів, до яких можна віднести сценарій можливої пожежі, розподіл та кількість пожежного навантаження згідно із даним сценарієм у протипожежних відсіках, теплотворну здатність даного пожежного навантаження, об'єм, конфігурацію приміщень, де може утворитися пожежа, у рамках протипожежних відсіках, тип матеріалів огорожувальних конструкцій, розташування, геометричну конфігурацію та площу прорізів у приміщеннях протипожежного відсіку, тип наявної вентиляції, включаючи протипожежну вентиляцію, тип наявних автоматичних вогнезахисних систем та ін. Такий стан зумовлює необхідність застосовувати складні математичні моделі тепломасообміну та проведення великого обсягу обчислень за цими моделями. Це у значній мірі позначилося на вимкненні пропозиції застосовувати уніфікований підхід, заснований на введенні універсальної моделі еталонної або «ідеальної» пожежі, що узагальнює великий досвід спостереження за пожежами. Застосування даного підходу може бути резонним з врахуванням уведених порівняно жорстких умов пожежі, що може бути вичерпним для описання більшості пожеж, що не мають виходити за встановлені температурні показники. Тобто в цьому випадку велика кількість пожеж, що виникають, мають набагато м'якіші умови. Серед таких підходів слід виділити два дуже схожих, за якими для описання теплового впливу пожежі пропонується використовувати уніфіковану температурну криву, що описує середньооб'ємну температуру у приміщенні із пожежею у залежності від часу її перебігу. У міжнародних нормах ISO 834 [8] та американських національних нормах ASTM E119 [29] рекомендовано використовувати майже однакові температурні криві. Температурна крива, рекомендована ISO 834, яка

згідно із введеною термінологією має назву стандартного температурного режиму пожежі визначається за формулою:

$$\theta_p(t) = 345 \cdot \lg(8t/60 + 1) + \theta_0, \quad (1.4)$$

де: t – поточний час розвитку пожежі, с;

θ_0 – початкова температура у приміщенні до пожежі, °C; $\theta_0 \approx 20$ °C;

$\theta_p(t)$ – середньообъемна температура у приміщенні під час пожежі, °C.

Формула для описання температурної кривої за рекомендаціями ASTM E119 має такий вигляд:

$$\theta_p(t_h) = \theta_0 + 750(1 - \exp(-3.79533 \sqrt{t_h})) + \sqrt{t_h}. \quad (1.5)$$

Тут t_h – поточний час теплового розвитку пожежі у годинах.

Також такий підхід застосований для узагальнення теплового впливу специфічних пожеж, таких як зовнішні пожежі, або пожежі на нафтозберігальних та нафтопереробних підприємствах, які ще називаються вуглеводневими пожежами [19-22]. На рис. 1.10 наведені графіки, що представляють описані вище температурні режими пожеж.

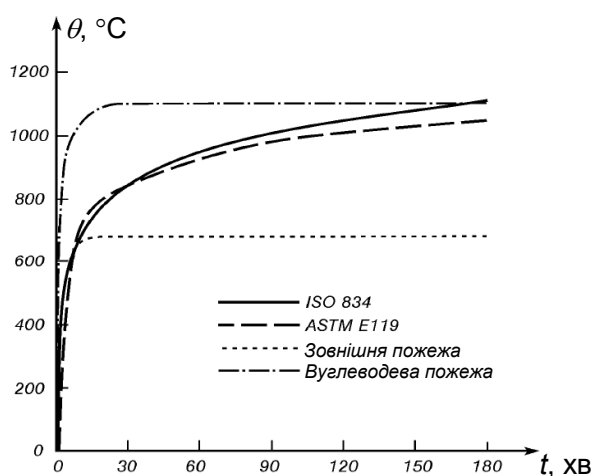


Рис. 1.10 - Температурні криві різних типів пожеж.

Слід звернути увагу на характерні особливості даних температурних режимів пожежі, які ще називають номінальними. Умови даних пожеж досить, жорсткі, оскільки майже за 10 хв досягається температура 600 °С. Окрім цього, дані температурні режими пожеж не мають ділянки спадання. Це позначається на виникненні дуже великих запасів вогнестійкості при застосуванні такого вогневого впливу пожежі

Наступне місце у ієрархії методів описання теплового впливу пожеж займають методи які встановлюють параметричні температурні криві, що враховують конкретні умови у будівлі шляхом введення найбільш значущих параметрів, які впливають на тепловий ефект пожежі. Прикладом такого підходу є рекомендований у нормах [10] та описаний у роботах [1-24] параметричний режим пожежі, описаний нижче.

Параметричний режим пожежі на стадії розвитку визначається функцією, що має вигляд виразу:

$$\Theta_g = 20 + 1325 (1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}). \quad (1.6)$$

Тут параметри даної функції визначаються через вирази:
приведений час розвитку пожежі:

$$t^* = t_h \times \Gamma; \Gamma = (O/b)^2 / (0,04/1160)^2,$$

де O – коефіцієнт прорізів у огороженні приміщення та обчислюється з використанням формули:

$$O = A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t, \quad (1.7)$$

де A_v - повна прорізів у вертикальних огорожувальних конструкціях, м², h_{eq} - усереднена висота прорізів у вертикальних огорожувальних конструкціях, м;

A_t - повна площа огорожувальних елементів конструкцій у приміщенні, де виникла пожежа;

b – термічний опір матеріалів огорожувальних конструкцій, який обчислюється за виразом:

$$b = \sqrt{\rho c \lambda}, \quad (1.8)$$

де ρ - густина матеріалу, з якого виготовлені огорожувальні конструкції, кг/м³; c - питома теплоємність матеріалу, з якого виготовлені огорожувальні конструкції, Дж/кг·°C; λ - теплопровідність матеріалу, з якого виготовлені огорожувальні конструкції, Вт/м·°C.

Максимальний час розвитку пожежі обчислюється за формулою:

$$t_{\max} = 0,0002 \times q_{t,d} / O. \quad (1.9)$$

Величина розрахункового питомого пожежного навантаження обчислюється за формулою:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \times m \times \delta_{q1} \times \delta_{q2} \times \delta_{qn} \quad (1.10)$$

m - коефіцієнт вигорання; δ_{q1} – коефіцієнт, що враховує ризик появи пожежі, залежний від площів протипожежного відсіку; δ_{q2} – коефіцієнт, який враховує ризик появи пожежі залежно від функціонального призначення приміщення; δ_{qn} - коефіцієнт, для врахування наявності протипожежних заходів та заходів для гасіння пожежі (при звичайних рішеннях протипожежних заходів коефіцієнт дорівнює 1,0. У випадку відсутності протипожежних заходів, даний коефіцієнт дорівнює 1,5); $q_{f,k}$ - нормативне питоме пожежне навантаження, що визначається відносно повної площі поверху (МДж/м²).

Параметричний режим пожежі на спадній гілці визначається за функцією:

$$\theta_g = \theta_{\max} - 625(t^* - t_{\max}^* \times X). \quad (1.11)$$

Тут $\theta_{\max}$ – величина максимальної температури у найвищій точці розвитку пожежі (°C), X – параметр, що враховує вплив прорізів на спадаючій гілці.

Більш точним вважаються підхід описання температурних режимів теплового впливу пожежі, що заснований на зонних моделях, описаний у роботах [25-50]. Даний підхід заснований на визначенні температурного режиму пожежі на основі запису рівнянь теплового балансу між окремими зонами у приміщенні із пожежею. Існують дві основні моделі – двозонна та трьохзонна.

Найвище місце за точністю та гнучкістю в ієрархії підходів щодо визначення температурного режиму пожежі займають методи, засновані на використанні польових моделей, що будуються у результаті застосування повної системи диференціальних рівнянь термогазодинаміки Нав'є-Стокса. Такий підхід добре описаний у роботах [14, 27-30].

Експериментальні методи досліджень є вартісними та трудомісткими і в деяких випадках не дозволяють провести оцінку вогнестійкості будівельних конструкцій із скляним огороженням із врахуванням їх конструктивних особливостей та схемами закріплення.

Застосування розрахункових методів для оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій із скляним огороженням є обмеженим.

Математичні моделі поведінки будівельних конструкцій із скляним огороженням в умовах пожежі є достатньо розвиненими, проте потребують удосконалення та адаптації для проведення інженерних розрахунків щодо оцінки вогнестійкості даних конструкцій.

1.3.1 Експериментальні методи оцінки вогнестійкості огорожувальних будівельних конструкцій із склінням

Експериментальний підхід щодо оцінки вогнестійкості будівельних огорожувальних конструкцій із склінням заснований на проведенні вогневих

випробувань, які реалізуються в спеціальних установках із дотриманням вимог відповідних стандартів [18 – 25]. Згідно із таким підходом досліджувані елементи несучих та огорожувальних залізобетонних конструкцій із склінням піддаються тепловому впливу з боку факелів у вогневій печі у комбінації із прикладенням до елементів досліджуваних залізобетонних конструкцій механічного навантаження, що має відповідати діючому навантаженню з врахуванням всіх проектних даних конструкторської документації.

Тепловий вплив пожежі на елементи огорожувальних конструкцій конструкцій із склінням відбувається при нагріванні простору вогневої печі за рахунок спалювання рідкого пального у факелах. У якості рідкого пального застосовується гас, мазут або дизельне пальне. У деяких випадках для формування факелу використовується природний газ. Температурний режим за відсутності особливих вимог має відповідати стандартному температурному режимові пожежі. На рис. 1.3 показана загальна схема вогневих випробувань конструкцій із склінням.

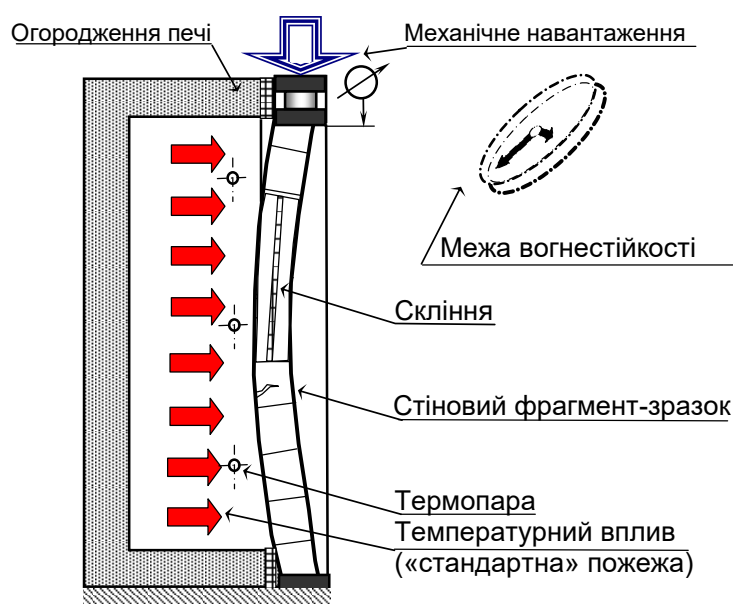


Рис. 1.11 - Схема улаштування установки для проведення вогневих випробувань зігнутих елементів залізобетонних конструкцій

Установка для вогневих випробувань елементів конструкцій із склінням у загальному випадку складається з вогневої печі, огороження яке є її основою. Огороження печі має бути достатньо міцним щоб витримувати навантаження, які можуть бути прикладені до досліджуваного елементу даної конструкції. Як правило, вогнева піч оснащується системою форсунок, комбінованою із системою їх живлення паливом та системою їх електронного керування. Система керування об'єднана із контрольно-вимірювальною системою температурних датчиків, що здійснює контроль температури у внутрішньому просторі вогневої печі та поверхні і внутрішніх шарів досліджуваних елементів конструкцій. Контрольна система доповнюється програмним забезпеченням для автоматичної фіксації, обробки вимірювань та керування форсунками для дотримання відповідного температурного режиму у камері вогневої печі.

На рис. 1.12 показаний зовнішній вигляд різних реальних діючих випробувальних установок в нашій та інших державах.

Контрольно-вимірювальна система має три аспекти у своєму функціональному призначенні: контроль температури в просторі вогневої печі, керування паливно-форсунковою системою та контроль деформацій досліджуваних елементів залізобетонних конструкцій. Як правило основним показником напружено-деформованого стану елемента залізобетонної конструкції є значення його найбільшого переміщення у поздовжньому або поперечному напрямку. Вимірювання переміщення досліджуваних залізобетонних конструкцій відбувається у місці найбільшого прогину для зігнутих елементів усередині його прольоту, або найбільшого поздовжнього переміщення верхнього кінця стиснутого елемента, до якого прикладене навантаження.

Важливою вимогою для забезпечення відповідної якості результатів експериментів до схеми встановлення термопар є необхідність гарантування, що пальникові факели не мають їх торкатися.

Досліджувані зразки залізобетонних конструкцій перед випробуваннями мають пройти стадію підготовки, що полягає у їх висушуванні. Потім зразки мають бути встановлені в установку та відповідним чином навантажені. У такому разі

досліджувані зразки не менш як за 15 хв до початку експерименту повинні бути навантажені відповідно до рівня, встановленого умовами випробування покроковим прикладанням навантажень і періодом витримки у навантаженому стані не менше за 1 добу. Навантаження досліджуваних зразків реалізується за методикою [23 – 25].



Рис. 1.12 - Зовнішній вигляд установок для вогневих випробувань скляних елементів огорожувальних конструкцій на вогнестійкість.

Підготовчий етап установки до випробувань має бути проведений відповідно до відповідних інструкцій з експлуатації. Деформації, що виникли після прикладання навантаження та періоду стабілізації досліджуваного елемента мають бути зафіксовані та відповідним чином зареєстровані.

Вимоги чинних стандартів України [14 – 16] дозволяють одночасне випробування двох зразків елементів конструкцій із склінням.

Під час проведення вогневих випробувань із дотриманням необхідних умов їх проведення за стандартними методиками мають бути вивчені статистичні дані та критерії, які визначають вірогідність та достовірність результатів вимірювання. Такі додаткові дослідження проводяться з метою зменшити вплив похибок, які імовірно можуть виникнути у ході проведення вогневих випробувань. Джерелами появи таких похибок можуть бути недосконалість вимірювальних засобів, вплив погодних або випадкових обставин на умови проведення експерименту, помилки при фіксації та обробці експериментальних даних. Окремою обставиною, що може бути джерелом істотної похибки є невідповідність умов навантаження та закріплення досліджуваних зразків залізобетонних конструкцій реальним умовам роботи конструкції у відповідній структурі.

Наведені вище особливості впливають на точність та достовірність результатів випробувань і можуть привести до появи похибки близько 30 % [36].

До недоліків експериментальних методів оцінки вогнестійкості конструкцій на основі вогневих випробувань слід також віднести велику вартість, трудомісткість, та негативний екологічний вплив.

Окремого обговорення заслуговує питання фіксації настання граничного стану втрати цілісності у процесі випробувань. Для фіксації ознак настання даного граничного стану, перерахованих у п. 1.2, необхідне проведення постійного контролю необігрівної поверхні досліджуваної огорожувальної конструкції протягом випробувань. Практичний досвід проведення вогневих випробувань показує, що такий контроль є утрудненим. Наприклад, точкове розташування ватних тампонів поблизу необігрівної поверхні не дозволяє однозначно встановити можливість настання або ненастання граничного стану втрати цілісності з причини локальності появи наскрізних отворів, положення яких може не співпадати із положенням контрольного ватного тампона. Детальний огляд необігрівної поверхні з метою фіксації глибоких або наскрізних тріщин можливий тільки при випробуванні вертикальних огорожувальних елементів. Стосовно горизонтальних конструкцій із склінням такий огляд можливий

тільки після проведення випробувань, оскільки необігрівна поверхня у цих умовах закрита гравітаційним навантаженням. Спостереження за допомогою проведення відеофіксації також не дозволяє отримання точного розташування глибоких та наскрізних дефектів. З цієї точки зору як недолік можна вказати на утруднене фіксування настання граничного стану втрати цілісності.

При фіксації ознак настання граничного стану втрати цілісності після проведення випробувань, коли зразок розвантажується і знімається з випробувальної установки, також може виникнути певна невизначеність, оскільки певні деформації зникають і тріщини можуть змикатись. Тому можуть бути зафіксовані тільки явні ознаки дефектів, які можна ідентифікувати саме як ознаки втрати цілісності. Тож можна зробити висновок, що при дослідженні настання граничного стану втрати цілісності у конструкціях із склінням на даному етапі розвитку експериментального підходу для оцінки вогнестійкості виникають суттєві питання щодо чіткості фіксування ознак настання такого граничного стану протягом та після випробувань

1.3.2 Розрахункові методи оцінки вогнестійкості огорожувальних будівельних конструкцій із склінням

Розрахункові методи оцінки вогнестійкості є розумною альтернативою до експериментальних методів, що до недавнього часу вважалися найбільш точними та прийнятними. Такий стан зберігався до того моменту, коли почали активно розвиватися обчислювальна техніка та програмні засоби, що дозволяють суттєво підвищувати продуктивність обчислювальних операцій. За таких умов стало можливим враховувати всі феноменологічні властивості матеріалів та особливості їх поведінки в нормальних умовах та в умовах впливу високих температур. Інтенсивний розвиток та практичне застосування розрахункових методів оцінки вогнестійкості огорожувальних конструкцій зі склінням завдячує систематизації великого практичного експериментального досвіду, спостережень за пожежами та особливості їх руйнівної дії щодо даних конструкцій. Даний практичний досвід дозволяє сформулювати ряд припущень та гіпотез для реалізації інженерних підходів щодо

розв'язку задач оцінювання вогнестійкості, на яких базуються відносно прості розрахункові експрес-методики, що мають високу продуктивність. Також набір сучасних знань про поведінку скла в умовах нагрівання при пожежі дозволяє врахувати її феноменологічні особливості при здійсненні загального теоретичного підходу. Загальний теоретичний підхід заснований на застосуванні диференціальних рівнянь напружено-деформованого стану твердого тіла, теплопровідності, термогазодинаміки при їхньому інтегруванні за допомогою чисельних методів. Прикладом таких методів є метод кінцевих різниць та кінцевих елементів. Викладене вище дозволяє розділити існуючі методи розрахункового оцінювання вогнестійкості елементів будівельних конструкцій на два умовні типи – спрощені та уточнені методи.

Спрощені методи розрахункового оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій у своїй основі використовують або існуючий 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 продуктивний розрахунковий підхід, проте, встановлені межі вогнестійкості конструкцій є суттєво завищеними і є причиною закладення у залізобетонні будівельні конструкції великих запасів вогнестійкості. Нормами [7-18], що містять рекомендації щодо застосування розрахункових методів при проектуванні вогнестійких залізобетонних конструкцій, вказуються такі методи як основні базові, оскільки вони є дуже продуктивними, економічними і інженерно осяжними для широкого класу фахівців. У цьому контексті великі запаси вогнестійкості сприймаються радше як їхня перевага.

Уточнені методи у своїй основі мають загальний теоретичний підхід, який розуміє використання диференціальних рівнянь для описання стану речовини у точці. В ієрархії методів розрахункового оцінювання 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 даного метода, можна виділити такі основні [27-60].

Згідно із даними рекомендаціями задача розрахунку параметрів елементів будівельних конструкцій в умовах теплового впливу пожежі розділяється на дві окремих основні задачі – теплову задачу та структурну задачу, які можуть вирішуватись комплексно, або окремо. Формально задача відтворення поведінки будівельних конструкцій в умовах нагрівання при пожежі з метою комплексного аналізу можливості настання одного з трьох типів граничних станів втрати вогнестійкості по своїй суті є задачею термопружності і термопластичності, оскільки тепловий вплив зумовлює зміну напружено-деформованого стану у склі, і навпаки зміна напружено-деформованого стану (НДС) може вплинути на умови нагрівання даних конструкцій. Крім цього, у роботах [27-36] зазначається, що суттєвого впливу на теплові та механічні процеси зазнають збоку газогідродинамічних процесів при нагріванні, випаровуванні та конденсації вологи, яка міститься у пористій внутрішній структурі бетону. Враховуючи, це система рівнянь, що описує тепловий, напружено-деформований стани всередині скла повинна містити рівняння, які комплексно описують термонапружений стан у точці та доповнені рівняннями стану води та водяної пари у порах бетону. Крім цього, особливості термомеханічних та теплофізичних процесів, що відбуваються всередині скла, мають бути враховані при описанні теплообміну між середовищами – газовим у приміщенні із пожежею та твердим тілом, тобто безпосередньо будівельними конструкціями із склінням. За таких умов математична модель, що комплексно описує всі фізико-хімічні процеси є надзвичайно складною і у такому комплексному вигляді з огляду на свою складність майже не застосовується [36], оскільки така комплексність може поставити під сумнів осяжність рішення подібних задач.

Без суттєвого погіршення точності можуть бути створені менш складні математичні моделі, які дозволяють достатньо чітко відтворювати всі перелічені процеси для ефективного прогнозування поведінки будівельних конструкцій із

склінням в умовах нагрівання при пожежі. Аналізуючи роботи [37-44], можна прийти до висновку, що для розв'язку задачі вогнестійкості даних 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 у роботах [37-44] називають ще структурною задачею.

Зважаючи на відокремлення теплової та структурної задачі, розрахункова оцінка вогнестійкості за уточненими методами відбувається з використанням усталеного традиційного підходу у два етапи. На першому етапі вирішується задача теплопровідності із застосуванням спрощеної схеми теплообміну між газовим пожежним середовищем та твердою фазою матеріалу скління на основі формулюванні крайової задачі теплопровідності із граничними умовами (ГУ) III роду [36]. Результатом розрахунку на першому етапі при розв'язку теплової задачі є отримання температурних розподілень у визначені моменти часу перебігу пожежі. Одержані результати уже на першому етапі дозволяють проаналізувати настання граничного стану втрати теплоізолювальної здатності таких будівельних конструкцій. Як правило розв'язок даної задачі не представляє особливої складності і не потребує суттєвих затрат часу.

Наступним етапом є аналіз структурної задачі, що дозволяє зафіксувати виникнення граничного стану втрати несучої здатності. Під час постановки задачі міцності скління під час 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. Для формування граничних умов, що прикладаються до елементів скління під тепловим впливом пожежі, у якості навантаження прикладаються діючі навантаження згідно із розрахунковими схемами конструкцій та температурні дані, отримані у ході розв'язку теплової задачі на першому етапі. Набір даних, що отримується у результаті розрахунків на цьому

етапі дозволяє зафіксувати настання граничного стану втрати цілісності через прямі макропараметри, що використовуються для фіксації даного граничного стану в умовах проведення вогневих випробувань, як це показано у роботах [64, 65].

Проте, не дивлячись 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 подібних 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 [66].

Реалізація обчислювальних алгоритмів інтегрування диференціальних рівнянь математичних моделей для описання поведінки скління в умовах теплового впливу пожежі є окремою складною задачею, що потребує відповідної кваліфікації дослідників, часу і, відповідно, суттєвих матеріальних та трудових затрат на її рішення. Тому є широкий досвід реалізації числових алгоритмів інтегрування рівнянь математичних моделей із використанням як основного інструменту одного з комерційних універсальних комп'ютерних комплексів, програмний код яких реалізує широкий спектр обчислювальних алгоритмів, у тому числі для спеціалізованих математичних моделей, розроблених для безпосередньо скла в умовах його роботи при підвищених або високих температурах його нагрівання. До таких комп'ютерних комплексів, безумовно, можна віднести універсальні системи ANSYS Workbench та ABAQUS.

Комп'ютерний комплекс ANSYS Workbench є універсальною системою, що дозволяє вирішувати задачі багатьох галузей фізики, з яких найбільший інтерес представляють модулі системи, що дозволяють комплексне рішення теплових та структурних задач. Найбільш ефективним модулем для рішення наукоємної задачі, якою є задача вогнестійкості конструкцій із склінням, залишається спеціалізований модуль ANSYS APDL. Даний модуль ще відомий

як ANSYS Mechanical у більш ранніх версіях даного програмного комплексу. Відомий широкий матеріал, висвітлений у роботах [32-44]. У даних роботах добре висвітлена ефективність даного підходу. Основна математична модель, реалізована у даному комплексі, заснована на використанні методу кінцевих елементів у нелінійній постановці для рішення теплової та структурної задач із використанням температурозалежних теплофізичних та механічних властивостей скла. Напружено-деформований стан розраховується за допомогою статичних рівнянь, складених на основі дискретизації системи за допомогою кінцевих елементів на базі методу переміщень. У даній системі також реалізований підхід із реалізацією алгоритму розрахунку параметрів напружено-деформованого стану із врахуванням утворення тріщин та дефектів у склі на основі використання теорії міцності скла та розрахунку на її основі руйнівних деформацій у ньому.

Не менш ефективним комплексом для рішення даного типу задач є комп'ютерний комплекс ABAQUS як системний модуль робочого місця для проведення математичного моделювання фізичних систем. Даний модуль розвиває такий же самий підхід, що реалізований у комплексі ANSYS APDL. Досвід використання даного комп'ютерного комплексу для рішення задач вогнестійкості будівельних конструкцій із склінням описаний у роботах [73-79].

Окремої уваги заслуговує підхід, описаний у роботах [61-63]. Даний підхід застосовує явний метод розрахунку (explicit method), який використовує для описання руху механічних систем в умовах термосилового впливу прикладених зусиль та високих температур під час пожежі рівняння динаміки. В цьому випадку суттєво знижуються складності, пов'язані із обумовленістю систем алгебраїчних рівнянь, які записуються у результаті дискретизації розрахункової області за допомогою кінцевих елементів. В роботах [65, 73-76] описаний підхід, що представляє елементи скління за допомогою пластин і балок із властивостями, які рекомендовані нормативними документами [66, 67]. Важливою особливістю даного підходу є можливість описати реалістичну картину розподілення тріщин у склі елементів залізобетонних будівельних

конструкцій. Для застосування такого підходу використовуються розрахункові модулі програмних комплексів ANSYS Workbench та ABAQUS, в кодах яких реалізований неявний метод.

Підсумовуючи викладене, слід зазначити, що уточнені розрахункові методи є ефективним засобом оцінки вогнестійкості конструкцій із склінням при фіксації часу настання граничних станів втрати теплоізолювальної здатності та цілісності. Це підтверджується численними даними, викладеними у роботах [73-75], де проведена верифікація отриманих розрахункових даних шляхом їх порівняння із експериментальними даними, одержаними у ході вогневих випробувань. Тому рекомендації, подані у нормативних документах [66-71], визначають дані методи як надійні і такі, що можуть застосовуватися для оцінки вогнестійкості, як засіб, що дозволяє обґрунтувати необхідні вимоги, якщо нижчі за ієрархією методи не дали очікуваних результатів. Суттєвою перевагою таких методів є їхня широка інформативність, наочність, можливість використовувати прямі макропараметри, такі як величини температура на необігрівій стороні елемента конструкції, максимального прогину та швидкість його наростання у залежності від часу, можливість аналізу конструкцій будь-якого типу та будь-якого типу навантажень та закріплень даних конструкцій, гнучкість при розгляді різного типу теплового впливу пожежі, включаючи реальні типи із врахуванням періоду згасання пожежі. До недоліків слід віднести складність математичних моделей, високі вимоги щодо засобів реалізації розрахунку та фахівців, що його здійснюють, великі трудові та часові затрати на підготовку математичних моделей та реалізацію розрахунку, велика вартість програмного та апаратного забезпечення і т.п.

Не дивлячись на вказані недоліки, переваги розрахункових методів характеризують їх як надзвичайно ефективний засіб для оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій із склінням. Причому в багатьох випадках розрахунковий підхід є єдино можливим для аналізу вогнестійкості великогабаритних, унікальних чи особливих конструкцій.

Особливої уваги, що на даний час існуючі нормативні документи [19-21] розвинених країн не містять рекомендацій щодо застосування розрахункових методів для оцінки теплоізолювальної здатності та цілісності за виключенням норм [22]. Тобто на даний час не існує методів розрахункової оцінки цілісності скління, що мали б апробовану практичну реалізацію, розвинену критеріальну базу, отримані оприлюднені результати із відповідною верифікацією. Норми [69, 70] рекомендують розглядати настання граничного стану втрати цілісності при появі крихкого руйнування скла.

Розгляду проблемі розрахункової оцінки вогнестійкості скління за граничним станом втрати цілісності присвячено певна низка досліджень, результати яких наведено у роботах [73-144]. Дані роботи, результати яких увійшли як рекомендації пов'язані із тим, що втрата цілісності пов'язана із настанням крихкого руйнування скла.

1.4. Властивості скла в умовах теплового впливу пожежі

Важливо мати достатні знання про скло як матеріал та його властивості. Для досягнення цієї мети в цьому розділі буде коротко розглянуто сучасні скляні матеріали та їх властивості. Крім того, цей розділ пропонує чіткий огляд переваг і недоліків цього продукту та його властивостей [73 – 101].

Скло - це розплавлені продукти неорганічних оксидів. Їх охолоджують до твердого стану. Даний процес проходить без утворення кристалів. Різниця між склом і кришталем полягає в розташуванні їх молекул. Діоксид кремнію є основною складовою кожного типу скла.

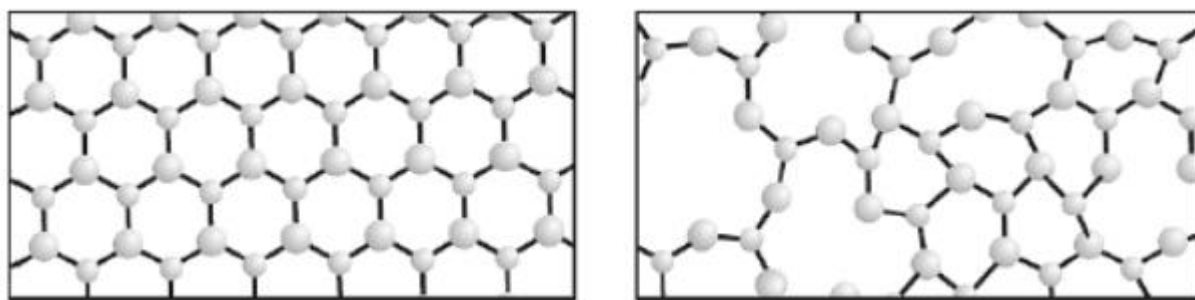


Рис. 1.13 - Приклади структури кристала та скла

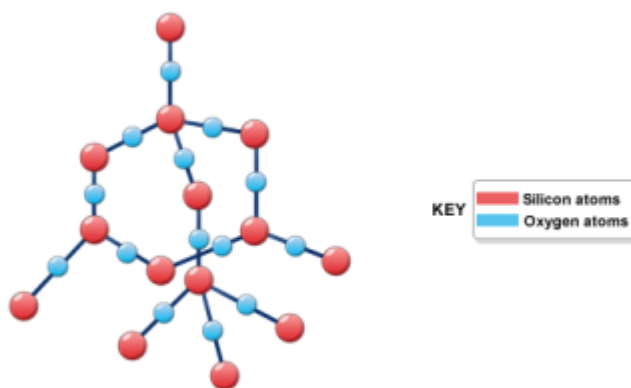


Рис. 1.14 - Молекула SiO_2 .

Склоподібний кремнезем — це тип скла, який виготовляється з чистого діоксиду кремнію. Інші типи скла потребують більше хімічних складів, таких як Na_2O , CaO , B_2O_5 тощо. Однак SiO_2 є сполукою, яка головним чином надає структуру матеріалу. Звичайні скла з діоксиду кремнію коротко розглядаються далі.

Склоподібний кварц і склоподібний кремнезем — дві інші назви цього типу скла. Як згадувалося раніше, цей матеріал складається лише з SiO_2 .

Склоподібний кварц виготовляється шляхом плавлення природного кристалічного кремнезему, такого як пісок або гірський кришталь. Спосіб виробництва - електричний або полум'яний. Після цього предмети виглядають прозорими, напівпрозорими або непрозорими; дає можливість створювати широкий асортимент продукції.

Плавлений кремнезем, який зазвичай називають синтетичним плавленим кварцом, виробляється з використанням кремнеземного піску високої чистоти, виготовленого з SiCl_4 . Зовнішній вигляд готового виробу буде прозорим.

Склоподібне кремнеземне скло у всіх його формах має різноманітні властивості [85-90], такі як:

- Проникність
- Надзвичайна твердість
- Порівняно малий коефіцієнт терморозширення
- Стійкість до високих температур (1000-1500 °C)
- Висока хімічна чистота
- Висока стійкість до корозії
- Широке оптичне пропускання від ультрафіолетового до інфрачервоного
- Відмінні електроізоляційні якості
- Чудова стабільність під час атомного бомбардування

(www.technicalglass.com)

Прикладами його застосування є труби для печей, освітлювальні труби та плавильні тиглі.

Вапняно-натрієве, боросилікатне та свинцево-силікатне скло - це три види, які виробляються в основному в промисловості. Натрієво-вапняно-кремнеземний тип скла, який використовується для виробництва флоат-скла. Натрій-вапняно-кремнеземне скло є продуктом переважно кремнезему (SiO_2), оксиду натрію (Na_2O) і оксиду кальцію (CaO). Термостійкість його низька (500-600 °C). Крім того, він має високий коефіцієнт терморозширення.

Це прозорий матеріал, який легко формується. Наприклад, цей тип скла використовується для більшості віконних склінь будівель. Пляшки, «низькотемпературні лампи розжарювання» та столовий посуд – кілька прикладів його застосування. Крім того, тарне скло — це вапняно-натрієве скло, яке є невеликою варіацією плоского скла, яке використовує більше глинозему та кальцію та менше натрію та магнію, які краще розчиняються у воді. Це робить його менш сприйнятливим до водної ерозії [18].

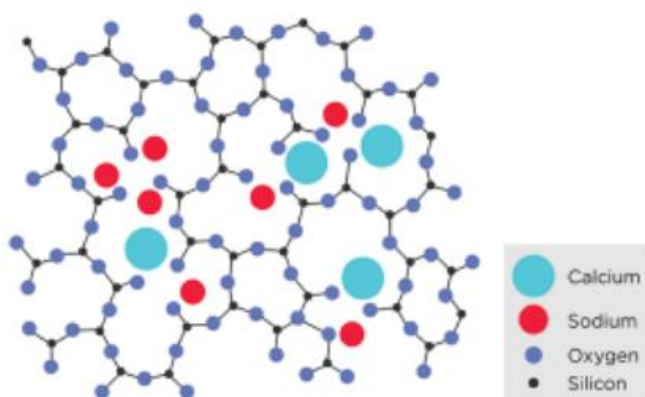


Рис. 1.15 - Структура кремнезему натрію.

Таблиця. 1.2 - Хімічний склад кремнеземної структури натрію

Тип формування скла	Хімічний склад							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
Скло вертикального витягування	71.8 - 72.4	1.8 - 2.2	0.2	6.4 - 6.7	3.8 - 4.2	14.5 - 14.9	0.5 - 1.5	0.5
Скло прокатного формування	72.5 - 72.8	1.0 - 1.5	0.08-0.1	8.6 - 8.8	3.6 - 3.8	13.2 - 13.4	-	-
Склоблоки	71.8 - 73.2	1.3 - 1.9	0.08-0.12	6.8 - 8.7	3.0 - 4.2	13.4 - 15.0	13.4 - 15.0	-

У галузі оптики прозорість — це фізична властивість пропускання світла через матеріал без розсіювання.

Там нічого не означає для поглинання світла у візуальних частотах. З цієї причини фотони не поглинаються і проходять через скло. Будь-який фотон має певну частоту, яка для видимого світла пов'язана з кольором світла, тоді як для нижніх або високих частот в електромагнітному спектрі це просто міра енергії, яку транспортує фотон. Спектр поглинання матеріалу залежить від структури матеріалу в атомному масштабі. Поглинання може здійснюватися атомами, які поглинають фотони, молекулами або ґратками. Існують важливі відмінності в цих можливостях поглинання:

Атоми поглинають чітко визначені дискретні частоти. Зазвичай окремі атоми поглинають лише кілька частот. Це залежить від енергетичного спектру його електронів. Стосовно атомного поглинання, графік поглинання

(побудований як функція частоти світла) містить чітко визначені піки для частот, коли відбувається поглинання, і взагалі немає поглинання між ними.

Молекули поглинають дискретні частоти, але існує набагато більше ліній поглинання, оскільки навіть проста молекула має набагато більше енергетичних рівнів, ніж будь-який атом. Тому молекули поглинають набагато більше світла.

Кристалічні решітки можуть поглинати не тільки дискретні частоти, але й безперервні смуги частот, головним чином через розбіжності в кристалічній структурі [80-95, 130].

Питома теплота об'єкта показує фактичну кількість тепла, необхідну для зміни температури в цьому конкретному об'єкті. Зміни питомої теплоємності для двох типів скла проілюстровано на наступних графіках [80-95, 130]. Перший показує значення питомої теплоємності для скла NaSiO_2 , а наступний представляє значення для складу Na_2O та SiO_2 . Це майже схоже на композиції сода-вапно-кремнезем. На жаль, точні дані для вапняно-натрієвого і кремнеземного скла при високих температурах недоступні. Тому в моделях використовували дані про склади Na_2O та SiO_2 .

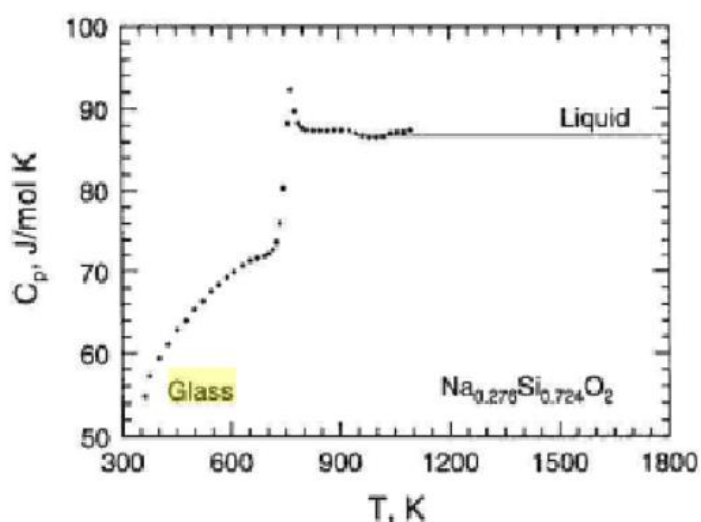


Рис. 1.16 - Зміна питомої теплоємності для NaSiO_2 .

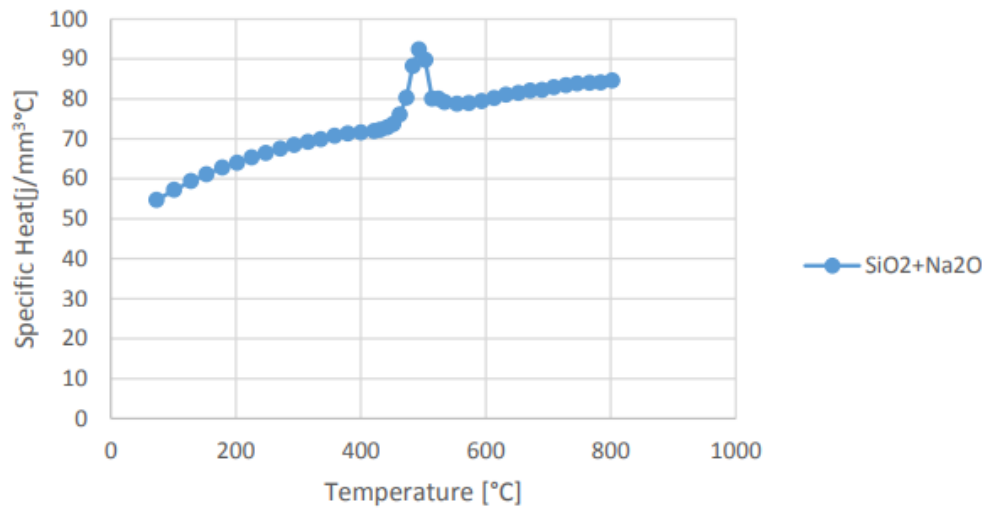


Рис. 1.17 - Зміна питомої теплоємності для SiO₂ & 27,6Na₂O+72,4SiO₂

Різні дані про провідність, отримані з літератури, проілюстровано на наступних графіках. Склоподібний кремнезем і боросилікат мають різкий ріст при високих температурах. Зростання для складу SiO₂ і Na₂O є незначним. Сірий графік показує різке зростання для віконного скла (натрієвого вапна), дані базуються на лекціях професора Richard Lehman, який провів багато досліджень у галузі властивостей скла та кераміки. Жовтий графік показує дуже невелику варіацію.

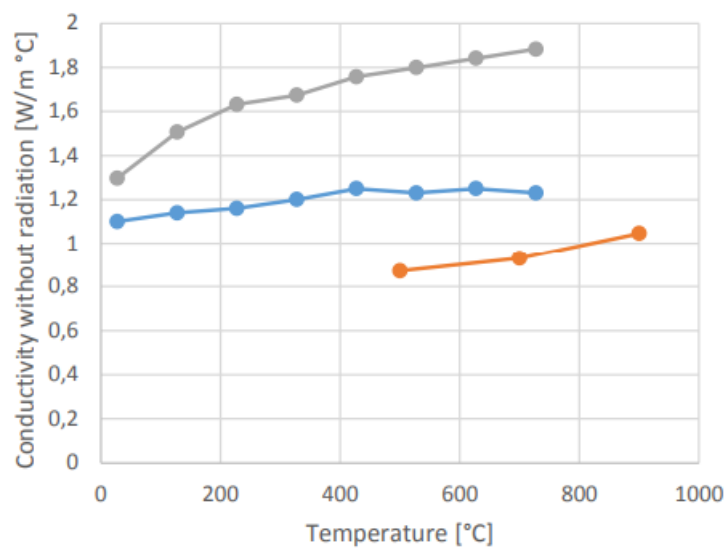


Рис. 1.17 - Залежність теплопровідності від температури.

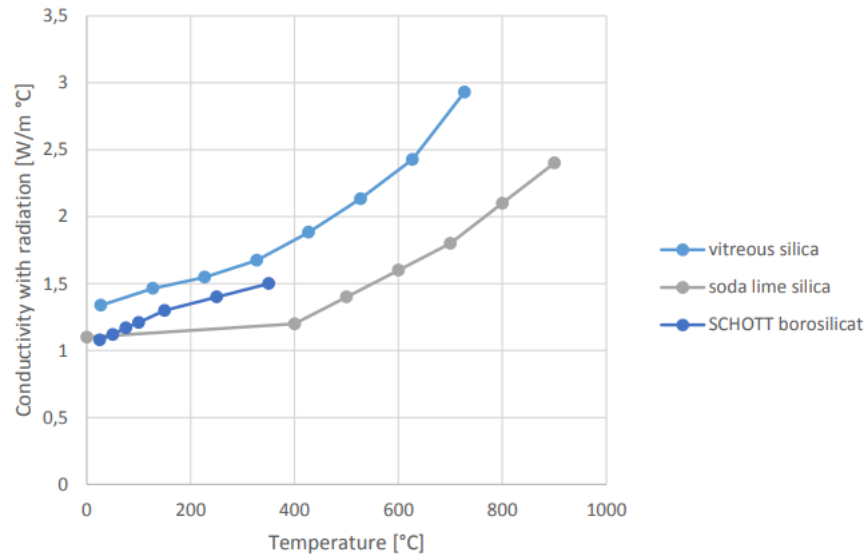


Рис. 1.18 - Залежність теплопровідності від температури.

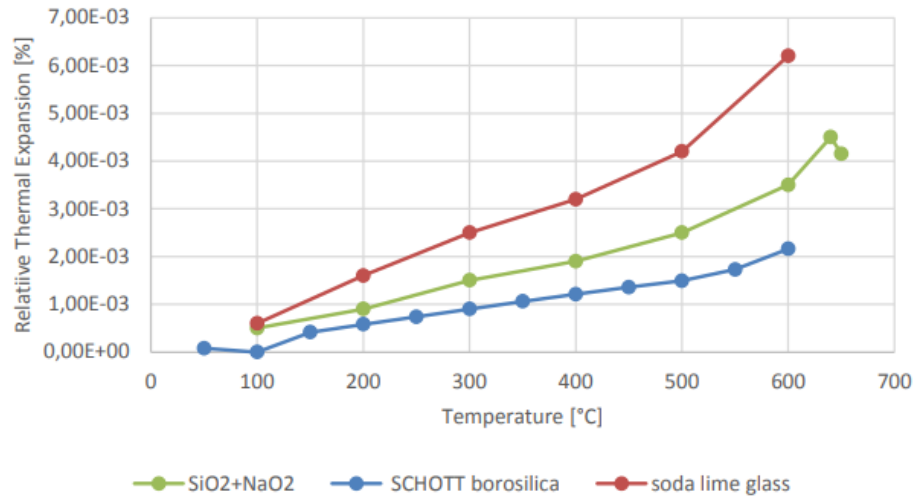


Рис. 1.19 - Залежність теплового розширення від температури.

Скло відоме як крихкий матеріал, який не має пластичних властивостей. Міцність скла залежить від багатьох факторів [80-95, 130]. Хоча скло здається ідеальним однорідним матеріалом, воно ніколи не буває ідеальним. На поверхні скла і особливо на краях присутні мікротріщини через процес виготовлення скла (пиляння, різання, свердління, шліфування країв і поверхні). Атоми навколо мікротріщини не здатні перегруповуватися або замінювати себе, оскільки вони не можуть пластично деформуватися. Це призводить до ще більш високого рівня напружень та швидкого розтріскування.

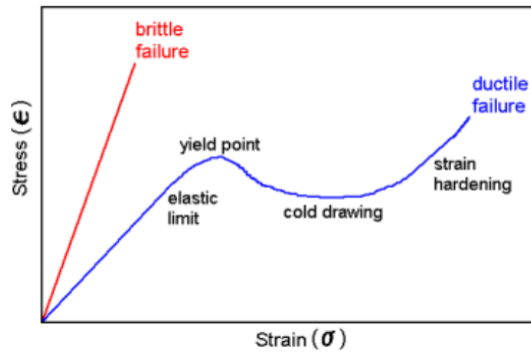


Рис. 1.20 - Графік порівняння значень напружень та деформації для скла та сталі

Дані для натронного вапна отримані за допомогою ультразвукової ехографії. Графік починається в точці 7 °С зі значенням 72 ГПа для модуля Е [80-95, 130].

Значення Е при 727 °С є останньою точкою, яку він виміряв. Вапно натрію має близько 53 ГПа на даний момент, що більше, ніж я прогножую при такій високій температурі. Цей графік показує, що вміст натронного вапна поступово знижується від початку до 527 °С. Після цього він падає швидше.

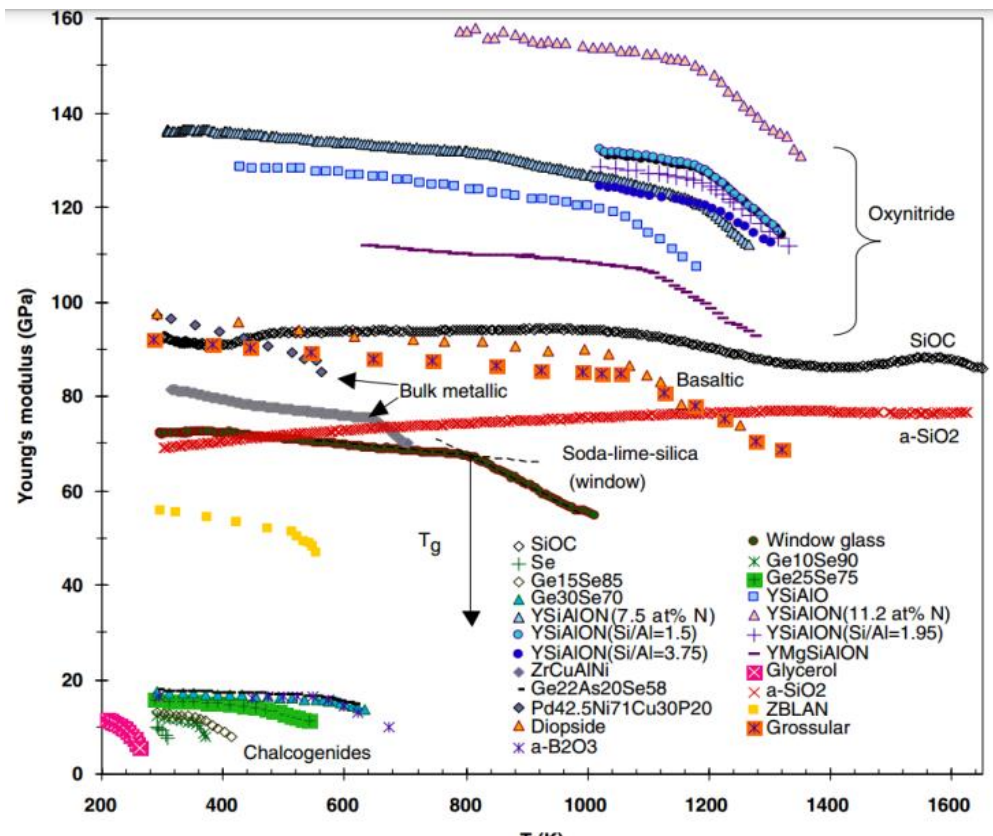


Рис. 1.21 - Температурна залежність модуля Юнга для різних типів скла.

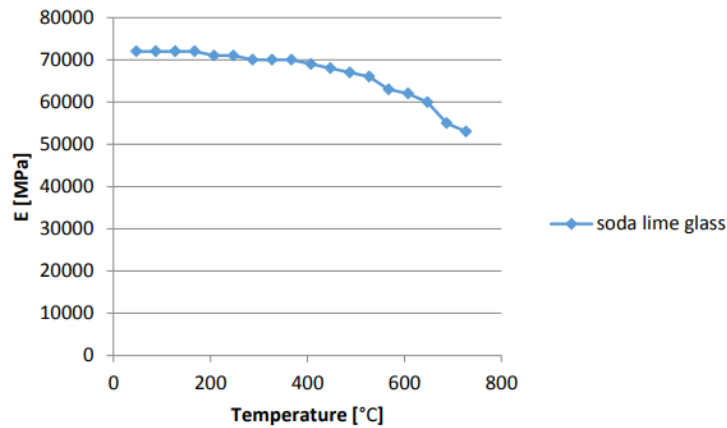


Рис. 1.22 - Модуль E натрієво-вапняного скла

1.5. Технологія вироблення скла

В даний час більшість типів скла виробляється за допомогою флоат-технології. У 1959 році брати Пілкінгтони відзначили деякі важливі переваги цього процесу [96 -135]:

- Низька вартість
- Широка доступність
- Хороша якість скла
- Можливість виготовлення великих склопакетів

Окрім масового виробництва, листове скло часто потребує подальшого розвитку. Ця додаткова обробка визначає форму, характеристики, властивості тощо кінцевого продукту.

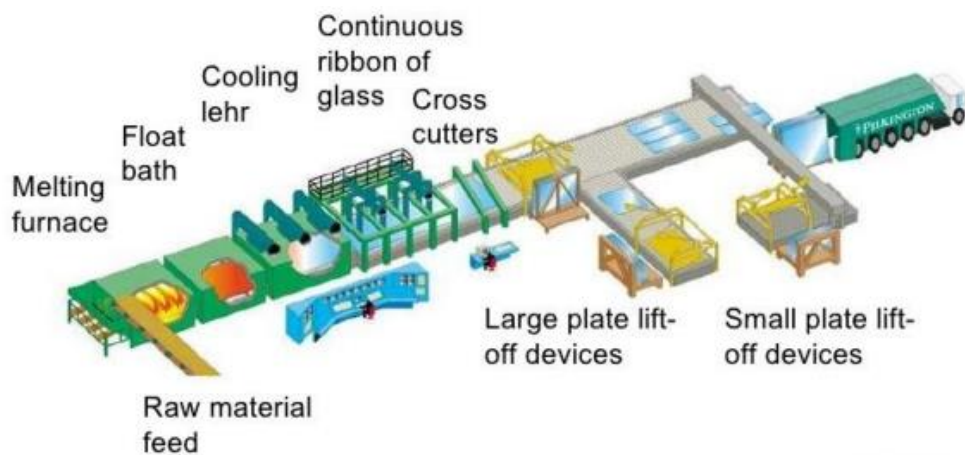


Рис. 1.23 - Процес виробництва флоат-скла.

Після флоат-процесу скло необхідно термічно обробити; це підвищує надійність скла. Концепція такої обробки заснована на розподілі внутрішнього напруження в шарі скла.

Для загартування скло потрібно нагріти приблизно до 700 °С. Крім того, флоат-скло слід охолоджувати холодним повітрям. Залежно від швидкості охолодження можна виробляти два типи загартованого скла: повністю загартоване та термозміцнене.

Під час процесу термічного загартування флоат-скло нагрівається приблизно до 620–675 °С (приблизно на 100 °С вище температури перетворення) у печі, а потім гартується (швидко охолоджується) струменями холодного повітря». (Haldimann, 2006). Цей вид скла має високу міцність на розрив. Крім того, повністю загартоване скло має здатність розбиватися на мільйони дрібних шматочків. Розміри цих частин становлять приблизно 100 мм², що має відносно незначний або незначний ефект пошкодження. Слід зазначити, що ці шматочки скла також можуть бути небезпечними, якщо вони падають з великої відстані. Саме тому цю категорію скла можна назвати відносно безпечним типом скла для застосування у будівельній галузі. Крім того, кількість тріщин, що утворюються при руйнуванні, безпосередньо пов'язана з міцністю скла: чим міцніше скло, тим більше тріщин. Це призводить до проблеми, якщо скло дуже міцне. Якщо скляні панелі руйнуються при надто високій нарузі руйнування, одночасно утворюється стільки тріщин, що напруга не може перейти з одного шару на інший. У цьому випадку конструкція вийде з ладу, тому що скляні панелі в шарах не мають достатньої зв'язності, щоб витримувати напруги зсуву між зоною розтягування, де діє армування, і зоною стиску, де скло, що тріснуло, несе напруги стиснення. Тому використання повністю загартованого скла є обмеженим.

Теплозміцнене скло виготовляється за тим же процесом, що й для повністю загартованого скла, але з меншою швидкістю охолодження. Залишкова напруга і, отже, міцність на розтяг нижчі. Структура руйнування термозміцненого скла подібна до розпаленого скла, з набагато більшими

фрагментами, ніж у повністю загартованого скла. Цей великий малюнок руйнування, який використовується в елементах з багатошарового скла, забезпечує значну структурну здатність після руйнування.

Цей значний патерн руйнування, що використовується в елементах багатошарового скла, забезпечує значну структурну стійкість після руйнування.

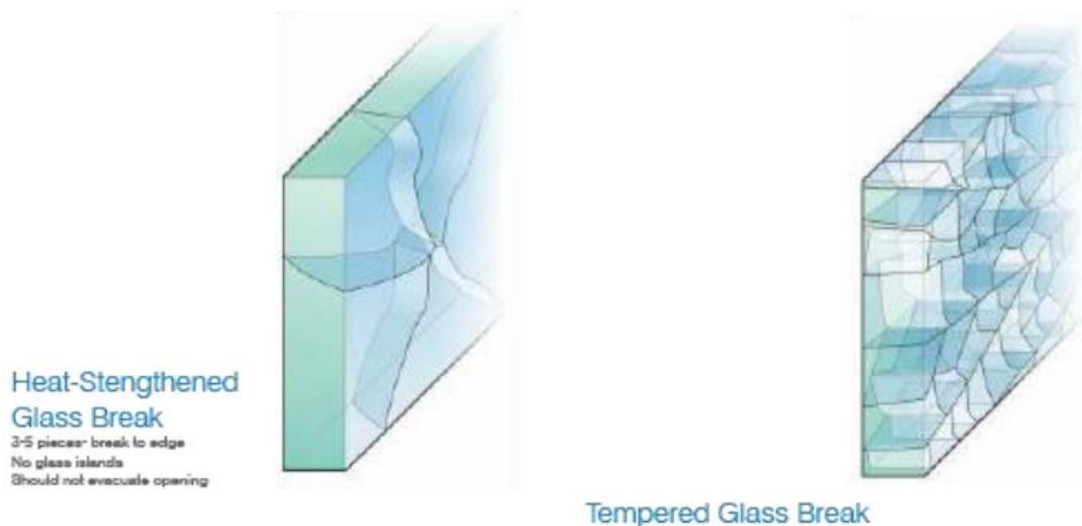


Рис. 1.24 - Термозміцнене скло і повністю загартоване скло.

Використання армованого багатошарового скла є методом підвищення залишкової стійкості. Необхідно додати шар армування між скляними шарами. Склад конструкції з армованого багатошарового скла представлений на наступних фотографіях. Армування необхідна через низьку міцність на вигин і несучу здатність осколків битого скла. Хоча від армування потрібна висока розтягуюча напруга, важливо також, щоб вони були дуже тонкими, щоб не порушувати прозорість об'єкта. Дослідження показали, що найкращими армуючими елементами є сітки з нержавіючої сталі або високоміцні пружини. Іншим варіантом є вбудовування виробів зі скловолокна або вуглецевого волокна в шари PVB.

У нижній верхній частині (зоні натягу) багатошарових скляних балок слід розмістити сталеву арматуру. Це армування допомагає склу набути міцності на розрив, може застосовуватися до багатошарового скла. Кілька випробувань армованого сталлю скла було проведено в TUDelft. Результати випробувань

показують, що армована скляна балка має певну несучу здатність після руйнування.

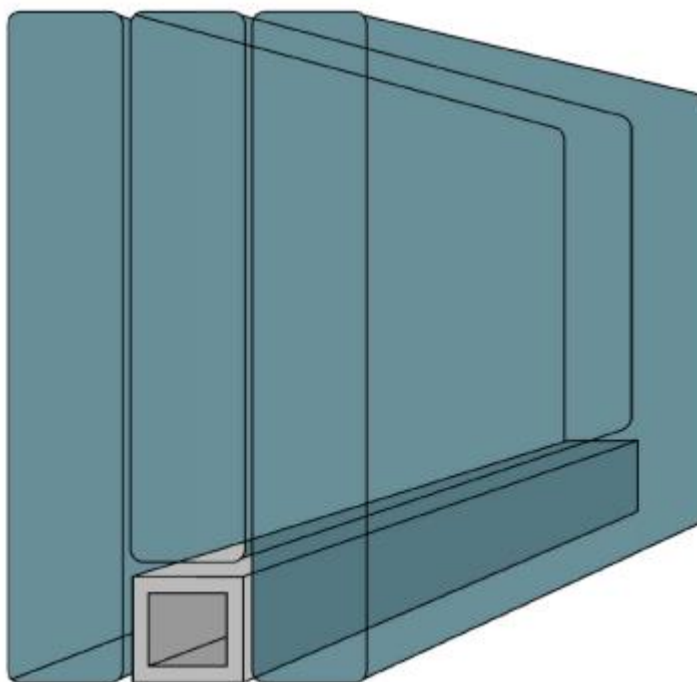


Рис. 1.25 - Скло, армоване сталевими елементами.

Як зазначалося раніше, важливо мати достатні знання про скло як матеріал та його властивості. З цієї причини проводиться дослідження літератури про сучасні скляні матеріали та їх властивості. Результати цих досліджень показують, що вапняно-натрієве скло – це тип скла, який в основному використовується для звичайного будівельного застосування. Але боросилікатне скло є більш правильним вибором для вогнестійкого скління; тому що він більш стійкий до зміни температури. Інші згадані види скла не підходять для будівельної промисловості. Доктор Лутер використовував вапняно-натрієве скло для своїх тестів у Емпра.

Крім того, визначаються термічні та механічні властивості скла. Результати цих досліджень показують, що всі властивості скла залежать від температури. Крім того, більшість отриманих даних взято зі старих книг, що означає, що немає достатньої оновленої інформації щодо властивостей скла при

високій температурі. Це може спричинити деякі відмінності між моделлю кінцевих елементів і результатами тестування.

Крім того, були розглянуті можливості скла як конструктивного елемента. У наступній таблиці наведено характеристики відпаленого, термозміцненого та повністю загартованого скла. Щоб досягти достатньої міцності на розрив при вигині та належної поведінки при руйнуванні, термозміцнене скло може бути застосовним варіантом для багатошарового конструкційного скла.

Таблиця. 1.3 - Характеристики відпаленого, термозміцненого та повністю загартованого скла

Характеристика	Відпалене скло	Термозміцнене	Повністю загартоване
Міцність на стиск, МПа	200	200	200
Міцність на розрив, МПа	45	70	120
Тип тріщини (руйнування)	Великі і гострі	Малі і не гострі	Дуже малі
Вартість	низька	висока	висока

1.6. Висновки до розділу

Підсумовуючи викладене у даному розділі, можна зазначити, що методи оцінювання вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій достатньо розвинуті. Проте система стандартизованих настанов методів оцінювання вогнестійкості даних конструкцій розвинена недостатньо і має певну кількість недоліків:

- експериментальний метод оцінки вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій на основі вогневих випробувань, не дивлячись на його наочність та ефективність, є дороговартісним та трудомістким;
- розрахункові методи оцінки вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій мають обмежене застосування для

аналізу задачі прогнозування втрати вогнестійкості через утруднення використання існуючих критеріїв настання граничного стану втрати цілісності для прогнозування його настання розрахунковим шляхом для скла;

- обмеження теоретичних уявлень про стан коли тріщини скління огорожувальних конструкцій стають наскрізними і чи можуть зберігати дані елементи при цьому свою несучу здатність і протягом якого часу;
- відсутності ієрархічної системи надійних осяжних розрахункових методик проектування вогнестійких огорожувальних конструкцій із склінням для забезпечення зберігання їхньої цілісності та теплоізолювальної здатності під час пожежі, яка включала б спрощені табличні методи.

Враховуючи викладене, слід зазначити, що розроблення осяжних інженерних розрахункових методів оцінки вогнестійкості огорожувальних конструкцій із склінням за встановленням умов настання граничного стану втрати теплоізолювальної здатності та цілісності та є актуальною науково-технічною задачею, рішення якої дозволяє надати інструменти для проектування вогнестійких конструкцій із склінням і тим самим створити передумови для забезпечення пожежної безпеки у сучасних об'єктах будівництва.

У зв'язку із цим були сформульовані мета та завдання дослідження.

Метою роботи є розкриття закономірностей змінення параметрів теплових процесів та напружено-деформованого стану у скляних елементах огорожувальних конструкцій в умовах теплового впливу пожежі як наукового підґрунтя для удосконалення стандартизованих методів розрахункового оцінювання їх вогнестійкості.

Задачі досліджень. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести аналіз статистичних відомостей щодо пожеж в Україні за останні роки, а також провести аналіз нормативної бази України та інших країн у галузі нормування вимог щодо вогнестійкості огорожувальних конструкцій із склінням.
2. Обґрунтувати математичну модель поведінки скляних елементів огорожувальних конструкцій в умовах нагрівання під тепловим впливом пожежі та визначити на її основі температурні режими нагрівання та умови руйнування даних скляних елементів
3. Розробити методику та провести вогневі випробування зразків скляних елементів огорожувальних конструкцій з метою дослідження їхніх температурних та деформаційних показників при тепловому впливі стандартного температурного режиму пожежі;
4. На основі отриманих експериментальних даних дослідити адекватність розрахункових даних шляхом їхнього порівняння із одержаними експериментальними даними;
5. Шляхом проведення повного факторного експерименту виявити закономірності залежності межі вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій від їхніх конструктивних параметрів і на їх основі обґрунтувати удосконалений метод оцінювання вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ СКЛЯНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІД ЧАС ПОЖЕЖІ

2.1 Методика математичного моделювання поведінки скляних елементів огороджувальних конструкцій та умови їхнього руйнування під час пожежі пожежі

На даний час дослідження, які дозволяють отримати нові теоретичні та експериментальні дані щодо поведінки та руйнування скляних елементів огороджувальних будівельних конструкцій в умовах пожежі, є актуальними. Відомо, що у Єврокодах наводяться розрахункові методи для оцінки вогнестійкості залізобетонних та сталезалізобетонних будівельних конструкцій [11, 15], кам'яних конструкцій [12], дерев'яних та алюмінієвих конструкцій [17]. Водночас, настанови для оцінки вогнестійкості скляних елементів огороджувальних будівельних конструкцій досі не розроблені. У існуючих нормативних документах щодо способів визначення вогнестійкості та пожежної небезпеки СПК [8, 9] наводяться експериментальні методи вогневих випробувань. Розрахункові методи оцінювання вогнестійкості скляних елементів огороджувальних конструкцій розроблені недостатньо і мають бути теоретично обґрунтовані.

Методика, наведена в [9], дозволяє визначати вогнестійкість зразків скла розміром не менше 1200×1000 мм, що не входить до складу будівельної конструкції. При цьому, згідно [9], встановлюється межа вогнестійкості за всіма граничними станами, необхідними для даного виду СПК, за критеріями несучої здатності, цілісності, ізоляції.

Вогнестійкість СПК полягає у її здатності зберігати несучі та захищаючі функції в умовах пожежі. У загальному випадку ця оцінка полягає у визначенні проміжку часу від початку вогневого впливу за стандартним температурним

режимом до настання одного з граничних станів по вогнестійкості, перерахованих вище.

Оскільки оцінка вогнестійкості стінових фрагментів із склінням, як і розгалужених скляних оздоблювальних огорожувальних конструкцій з використанням їхніх вогневих випробувань на вогнестійкість є утрудненим, нами пропонується застосування розрахункового підходу. Реалізація методів розрахункового оцінювання класу вогнестійкості заснована на використанні діючих в Україні нормативною базою, що узгоджується із відповідними нормативними документами Євросоюзу, довідниковими та навчальними джерелами, а також підтверджується результатами наукових робіт вітчизняних та закордонних дослідників, які верифіковані та визнані науковою спільнотою і є частиною основної бази літературних посилань та цитувань спеціалістами у галузі пожежної безпеки будівельних об'єктів.

Враховуючи можливу невідповідність досліджуваних елементів конструкцій вимогам щодо класу їх вогнестійкості, має бути запропоноване відповідне технічне рішення, для підвищення вогнестійкості відповідного елемента конструкції із склінням. Для обґрунтування типу вогнезахисних систем і його технічних характеристик застосовуються технічні умови відомих виробників, продукція яких є сертифікованою в Україні.

Вся сукупність запропонованих розрахункових методик і підходів спрямована на досягнення важливого технічного результату – забезпечення пожежної безпеки елементів огорожувальних будівельних конструкцій із склінням шляхом встановлення їх відповідності протипожежним вимогам існуючих будівельних норм.

Застосування даної методики можливе для встановлення розрахунковим шляхом відповідності огорожувальних будівельних конструкцій із склінням встановленим вимогам щодо їх вогнестійкості.

Методика розроблена у відповідності до чинних в Україні нормативних документів та наукових робіт. Основні процедури методики засновані на положеннях, що рекомендовані для застосування стандартами [9 – 18].

Методика призначена для оцінки класу вогнестійкості елементів огорожувальних будівельних конструкцій із склінням та спеціальних оздоблювальних елементів у приміщеннях та ззовні будівель. Сюди відносяться перегородки і стіни із скляними огорожувальними елементами: скляні стінки з віконного силікатного скла, вітринного скла, загартованого скла, вогнетривкого скла із прошарком із термогелю та огороження із склоблоків. До таких конструкцій також належать віконні та світопрозорі скляні фасадні системи.

При розгляді граничних станів у даній ситуації треба врахувати відсутність навантаження на перегородки та стіни, оскільки вони зводиться на несучих елементах опорного вузла, тому клас вогнестійкості даних елементів оцінюється тільки за зберіганням нею огорожувальних функцій – граничними станами втрати цілісності та теплоізолювальної здатності. А за несучою здатністю оцінюються відповідні елементи вузла, на який вона спирається. За граничним станом несучої здатності може бути оцінені тільки самонесучі стіни до яких включені скління із склоблоками. У табл. 2.1 поданий приблизний перелік можливих вимог щодо вогнестійкості огорожувальних будівельних конструкцій із склінням.

Таблиця 2.1 – Скляні елементи огорожувальних конструкцій, що піддаються оцінюванню їхнього класу вогнестійкості

Елемент конструкції/Тип огорожувальної конструкції	Матеріал конструкції	Найжорсткіший клас вогнест.
Зовнішня стіна/Фасадна система	Віконне скло із повітряними прошарками	E 30
Ненесуча стіна/ Внутрішня перегородка	Вітринне загартоване скло, віконне скло із повітряними прошарками	EI 30
Ненесуча стіна/ Протипожежна перегородка	Віконне скло із прошарком із термогелю	EI 45
Самонесуча стіна	Скління із склоблоками	REI 90
Протипожежні двері	Віконне скло із прошарком із термогелю	

Продовження табл. 2.1

Вітринні системи, руйнування яких утворює перешкоди на шляхах евакуації/ Зовнішнє або внутрішнє оздоблення інтер'єру	Вітринне загартоване скло	Е 90
---	---------------------------	------

Розрахункова оцінка класу вогнестійкості скління в огорожувальних конструкціях має виконуватися у послідовності, що викладена нижче.

1. Обчислюються температурні розподілення у перерізі скляних елементів огорожувальної конструкції за допомогою числового рішення задачі теплопровідності, що дозволяє розрахувати час нагріву необігрівній стороні скляного елемента температури, при якій фіксується граничний стан втрати теплоізолювальної здатності.

2. Використовуючи одержані температурні розподіли у перерізі скляних елементів для часу, зумовленим класом вогнестійкості, оцінюється можливість появи граничного стану втрати цілісності при припущенні, що виникнення тріщин у склінні є однозначним критерієм появи даного граничного стану. За обчисленим значенням часу фіксування граничних станів встановлюється відповідність огорожувальної конструкції даному класу вогнестійкості.

3. За умови необхідності розрахунку вогнестійкості огорожувальної конструкції із склінням за граничним станом втрати несучої здатності має виконуватися спрощений розрахунок несучої здатності конструкції із врахуванням наявного скління.

4. Для розрахунку температурного розподілення по перерізу скління та матеріалу поза склінням огорожувальної конструкції мають бути враховані рекомендації норм [10].

5. При розрахунку цілісності скління у конструкції для визначення умов появи тріщин у склінні використовується як основний критерій використовується термостійкість скла, що є довідниковою характеристикою для всіх основних типів конструкційного скла.

6. За умови невідповідності конструкції встановленому класу вогнестійкості досліджуваних скляних елементів є меншим виконується подальше обґрунтування проектних рішень щодо підвищення вогнестійкості даних елементів конструкцій.

2.1.1. Розрахункове оцінювання класу вогнестійкості скляних елементів огорожувальних будівельних конструкцій за настанням граничного стану втрати теплоізолювальної здатності

При розгляді теплової дії пожежі на елементи скління огорожувальних конструкцій згідно із конструктивними схемами приходимо до висновку, що її можна розглядати як односторонній тепловий вплив на нескінченну пластину із певною товщиною

Для обчислення розподілів температури по перерізу скляних елементів використовується розрахункова методика, яка має у свої основі числовий розв'язок диференціального рівняння теплопровідності з використанням граничних умов (ГУ) III роду. Даний порядок розрахунку зумовлений рекомендаціями чинних стандартів України [10-12] і детально розкритий у роботах [11, 14]. Крайова задача теплопровідності у цьому разі була сформульована з застосуванням розрахункової схеми, що наведена на рис. 2.1.

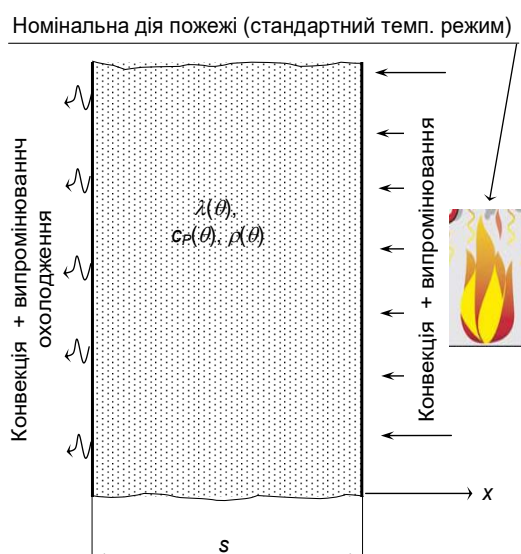


Рис. 2.1 - Розрахункова схема скляного елемента огорожувальної конструкції при його односторонньому нагріванні.

2.1.2. Математична модель процесу теплопередачі

Математична модель процесу теплопередачі у скляному елементі заснована на використанні диференціального рівняння теплопровідності у такому вигляді [10, 47, 81, 83, 86]:

$$c(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right), \quad (2.1)$$

де $c(\theta) = \rho(\theta)c_p(\theta)$ - об'ємна теплоємність скла.

Формула для описання ГУ III роду поверхні, що обігрівается, має вигляд [10, 47, 81, 83, 86]:

$$-\lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=b} = \alpha_p (\theta_p - \theta_w) \quad (2.2)$$

Тут θ_p , θ_w – температурні показники у просторі приміщення із пожежею та обігрівної поверхні скляного елементу.

Формула для ГУ III роду необігрівної поверхні скляного елементу має такий вигляд [10, 47, 81, 83, 86]:

$$-\lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_n (293 - \theta_n) \quad (2.3)$$

Тут α , α_k – величини коефіцієнтів теплообміну відповідно на обігрівній та необігрівній поверхнях скляного елементу.

З рекомендаціями стандартів України [7, 10-13], для обчислення температурних розподілів застосовується стандартна температурна крива пожежі, що описується рівністю:

$$\theta_p(t) = 345 \cdot \lg(8t/60 + 1) + \theta_0, \quad (2.4)$$

де: t – час перебігу пожежі, с;

θ_0 – початкова температура у приміщенні перед виникненням пожежі, °С; $\theta_0 \approx 20^\circ\text{C}$;

$\theta_p(t)$ - температура у приміщенні із пожежею після її виникнення, °С.

Для числового рішення диференціального рівняння теплопровідності використано метод скінченних різниць.

Диференціальне рівняння теплопровідності (2.1) записується у лінеаризованому вигляді через використання інтегро-інтерполяційного методу [10, 47, 81, 83, 86].

Ліва частина диференціального рівняння теплопровідності апроксимується за методом скінченних різниць через вираз [47]:

$$c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = c \left(\frac{\theta_{i,k} + \theta_{i,k+1}}{2} \right) \cdot \frac{\theta_{i,k+1} - \theta_{i,k}}{\Delta t} . \quad (2.5)$$

Права частина диференціального рівняння теплопровідності (2.1) у записі через скінченні різниці має вигляд рівності [10, 47, 81, 83, 86]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) = a_x \theta_{i-1,k}^x - (a_x + b_x) \theta_{i,k}^x + b_x \theta_{i+1,k}^x \quad (2.6)$$

У разі використання температурної залежності коефіцієнту теплопровідності скла застосування інтегро-інтерполяційного методу [47] приводить до встановлення коефіцієнтів алгебраїчних рівнянь для апроксимації рівняння (2.1) скінченними різницями:

$$a = \frac{\lambda(\theta_{i-1})\lambda(\theta_i)}{(\lambda(\theta_{i-1}) + \lambda(\theta_i))h^2}, \quad b = \frac{\lambda(\theta_{i+1})\lambda(\theta_i)}{(\lambda(\theta_{i+1}) + \lambda(\theta_i))h^2} \quad (2.7)$$

Застосування формул (2.5) - (2.7) для апроксимації рівняння теплопровідності скінченними різницями використовуються рекурентні формули для визначення температур вузлів на часовому кроці $k+1$ за попередньо обчисленими значеннями температури вузлових точок на k -му кроці за часом. Записані рекурентні формули мають неявний вигляд і вирішуються як система нелінійних алгебраїчних рівнянь.

ГУ III роду у записі через скінченні різниці має запис у вигляді рівності [47]:

$$\frac{\lambda(\theta_{w_k})\lambda(\theta_{1,k})}{\lambda(\theta_{w_k}) + \lambda(\theta_{1,k})} \cdot \frac{\theta_{w_k} - \theta_{1,k}}{h} + \frac{h \cdot c(\theta_{1,k})}{2 \cdot \Delta t} \cdot (\theta_{1,k} - \theta_{1,k-1}) = \alpha_k (\theta_{1,k} - \theta_{p,k}) \quad (2.8)$$

де θ_p – температура за стандартним режимом пожежі визначується за виразом (2.4);

α – коефіцієнт теплообміну на поверхнях скляного елемента;

$h = 0.025$ м – крок дискретизації перерізу скляного елемента через скінченні різниці;

$\Delta t = 60$ с – крок за часом.

Крок за часом та крок розташування вузлів сітки скінченних різниць встановлюється через критерій збіжності вибраного варіанту розбиття даної скінченно-різницевої схеми.

2.1.3. Розрахунок цілісності та несучої здатності скління в умовах пожежі

Розрахунок параметрів напружено-деформованого стану (НДС) у скляних елементах огорожувальних конструкцій виконувався на базі узагальненого

інженерно-теоретичного підходу, що має у своїй основі такі положення та припущення.

1. Для обчислення параметрів НДС у скляних елементах огорожувальних конструкцій застосовано загальний інженерно-теоретичний підхід, що включає використання системи диференціальних рівнянь механіки, що втілюють загальні консервативні закони та рівнянь НДС при взаємодії між компонентами досліджуваних механічних систем, що наближуються за методом скінченних елементів (МСЕ).

2. Для моделювання скляних панелей застосовуються двовимірні плоскі скінченні елементи (СЕ) чотирикутної форми типу Беличко-Цая [61-63] із чотирма вузлами.

3. У для математичного моделювання деформування матеріалу скляних елементів залучено термопружний матеріал із врахуванням його пластичних деформацій.

4. Прикладання механічних та температурних навантажень має відповідати динамічній історії та здійснюється поступово починаючи з прикладення власної ваги, діючого навантаження та на останньому етапі прикладання температурного навантаження згідно із результатами попередньо проведеного теплового розрахунку.

На рис. 2.2 показана схема динаміки руху тіла, від початкового моменту часу $t = 0$ у поточне положення.

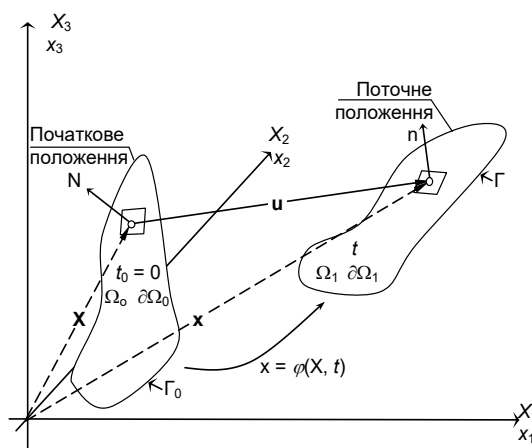


Рис. 2.2 – Схема описання динаміки руху деформованого тіла.

Основне рівняння динаміки руху при взаємодії деформованих тіл при на основі консервативних законів механіки згідно із роботами Беличко, Флангана та ін. [61-63] записується у вигляді рівняння балансу імпульсу, що записується через рівність:

$$\sigma_{ij,i} + \rho \cdot f_i = \rho \cdot \ddot{x}_i, \quad (2.9)$$

де $\sigma_{ij,i}$ - тензор напружень;

ρ – густина матеріалу скління;

$\rho \cdot f_i$ - зовнішні силові фактори;

$\ddot{x}_i$ - прискорення точок тіла.

Рівняння збереження маси має запис через рівність:

$$\rho \cdot \det(\mathbf{J}) = \rho_0, \quad (2.10)$$

де ρ_0 – густина скла до взаємодії;

$\det(\mathbf{J})$ – Якобіан.

Рівняння балансу енергії є сумою кінетичної та енергії деформованого тіла, рівною сумі робіт зовнішніх силових факторів.

$$P^{int} + P^{kin} = P^{ext} + P^{heat}. \quad (2.11)$$

Кінетична енергія розраховується через рівність:

$$P^{kin} = 0.5 \frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} d\Omega \quad (2.12)$$

Внутрішня енергія розраховується за формулою:

$$P^{ext} = \int_{\Omega} \mathbf{v} \cdot \rho \mathbf{b} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{v} \cdot \mathbf{t} d\Gamma \quad (2.13)$$

За умови відсутності внутрішніх джерел тепла, рівняння збереження енергії у відповідності до робіт [60-62] має вигляд рівності:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho w^{int} + (0.5 \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{v} \cdot \rho \mathbf{b} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{v} \cdot \mathbf{t} d\Gamma \quad (2.14)$$

Для деформованого тіла рівняння балансу енергії після перетворення має запис через вираз:

$$\rho \dot{w}^{int} = 0.5 \sigma_{ij} \left[\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right] \quad (2.15)$$

Граничні умови, які встановлюють обмеження на рух тіла Γ_f мають запис через формулу:

$$\sigma_{ij} n_j = t_i(t) \quad (2.16)$$

Тут n_j – позначення вектору нормалі до поверхні границі тіла, направленою у зовнішньому напрямку.

Граничні умови для опису деформації границі тіла записуються у вигляді рівності

$$x_i(\mathbf{X}, t) = \bar{x}_i(t) \quad (2.17)$$

При виникненні контактної взаємодії між досліджуваними тілами, граничні умови набувають такого вигляду:

$$\left(\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-\right) n_j = 0 \quad (2.18)$$

Рівняння балансу, записане з використанням принципу віртуальних робіт має такий вигляд:

$$\int_{\Omega} [\rho \ddot{x}_i + \sigma_{ij,j} - \rho f_i] \delta x_i d\Omega + \int_{\Gamma_f} [\sigma_{ij} n_j - t_i] \delta x_i d\Gamma + \int_{\Gamma_c} (\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_j \delta x_i d\Gamma = 0 \quad (2.19)$$

Формула для встановлення форми СЕ записується через рівність:

$$x_i(\mathbf{X}, t) = \bar{x}_i(\mathbf{X}(\xi, \eta, \zeta), t) = \sum_{j=1}^m \phi_j(\xi, \eta, \zeta) x_i^j(t). \quad (2.20)$$

Тут ϕ_j – функція параметрів форми СЕ;

m – число вузлів, відповідне до форми СЕ;

x_{ij} – набір координат вузлів.

Внутрішня енергія СЕ має вигляд рівності:

$$\delta \Pi_e = \int_{\Omega_e} \rho \ddot{x}_i \Phi_i^e d\Omega + \int_{\Omega_e} \sigma_{ij} \Phi_{ij}^e d\Omega - \int_{\Omega_e} \rho f_i \Phi_i^e d\Omega - \int_{\Gamma_e} t_i \Phi_i^e d\Gamma. \quad (2.21)$$

Тут $\Phi_i^e = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_k)_i^e$.

Для цього набору СЕ рівняння збереження енергії записується через принцип можливих переміщень через рівність:

$$\sum_{e=1}^{en} \left[\int_{\Omega_e} \rho \ddot{x}_i \Phi_i^e d\Omega + \int_{\Omega_e} \sigma_{ij} \Phi_{ij}^e d\Omega - \int_{\Omega_e} \rho f_i \Phi_i^e d\Omega - \int_{\Gamma_e} t_i \Phi_i^e d\Gamma \right] = 0 \quad (2.22)$$

У матричній формі рівняння (2.22) має такий запис:

$$\sum_{e=1}^{en} \left[\int_{\Omega_e} \rho \mathbf{N}^T \mathbf{N} \mathbf{a}_e d\Omega + \int_{\Omega_e} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} d\Omega - \int_{\Omega_e} \rho \mathbf{N}^T \mathbf{b} d\Omega - \int_{\Gamma_e} \mathbf{N}^T \mathbf{t} d\Gamma \right] = 0 \quad (2.23)$$

де $\mathbf{N}$ – інтерполяційна функцій форми СЕ;

$\mathbf{B}$ – матриця жорсткості;

$\mathbf{a}_e$ – вектор прискорень вузлів;

$\boldsymbol{\sigma}$ - вектор напружень;

$\mathbf{b}$ – вектор внутрішніх зусиль;

$\mathbf{t}$ – вектор зовнішніх сил.

На рис. 2.2 показана схема врахування контактної взаємодії деформованих тіл при їх зіштовхуванні.

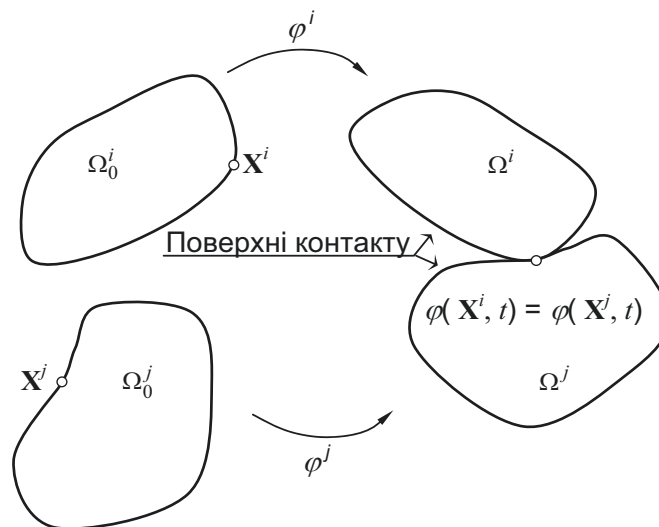


Рис. 2.3 - Схема до врахування контактної взаємодії деформованих тіл.

Для ідентифікації виникнення контактної взаємодії застосовується умова Герца-Синьоріні-Мора [60-62]:

$$g \geq 0, \lambda \geq 0, g\lambda \geq 0. \quad (2.24)$$

Тут g – характеристика зазору між тілами, що розраховується за формулою:

$$g(\mathbf{x}^i, t) = (\mathbf{x}^i - \mathbf{x}^j)^T \mathbf{n} \quad (2.25)$$

Схема, що розкриває систему позначень параметрів контактної взаємодії наведена на рис. 2.4.

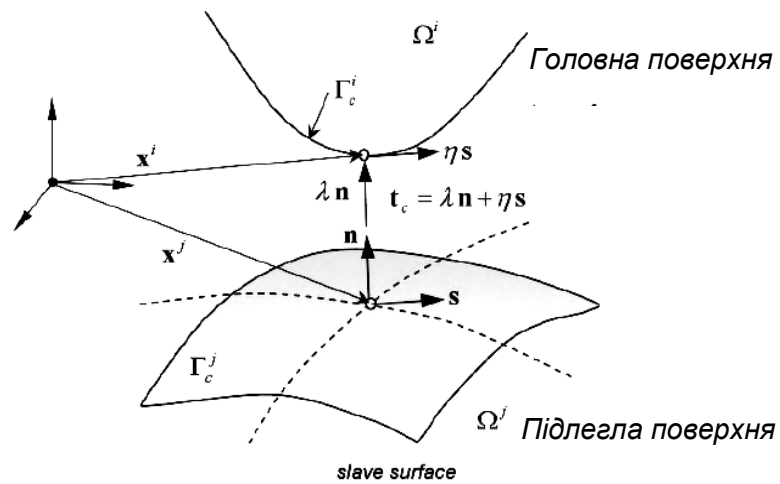


Рис. 2.4 - Система позначень параметрів контактної взаємодії.

Сили тертя розраховуються за законом Кулона. Величина дотичної швидкості обчислюється через вираз:

$$\dot{u}(\mathbf{x}^i, t) = (\dot{\mathbf{u}}^i - \dot{\mathbf{u}}^j)^T \mathbf{s} \quad (2.26)$$

Закону Кулона записується в узагальненій формі через вираз:

$$\begin{cases} |\tau| \leq 1 \\ \text{якщо } |\tau| < 1 \text{ приймається } \dot{u} = 0 \\ \text{при } |\tau| < 1 \text{ приймається } \text{sign}(\dot{u}) = \text{sign}(\tau) \end{cases} \quad (2.27)$$

Величина τ розраховується за формулою:

$$\tau = \frac{\eta}{\mu\lambda}, \quad (2.28)$$

де μ - коефіцієнт тертя.

Для визначення взаємного проникнення СЕ при їхньому контакті залучається метод штрафних функцій у комбінації із методом множення Лагранжа [60-62].

Обчислення швидкостей у вузлових точках СЕ при реалізації явного метода інтегрування рівнянь динаміки відбувається з використанням формули [61-63]:

$$\mathbf{v}^{n+0.5} = (\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^n) / \Delta t^{n+0.5} \Rightarrow \mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^n + \Delta t^{n+0.5} \mathbf{v}^{n+0.5} \quad (2.29)$$

Переміщення вузлових точок КЕ обчислюються із використанням формули:

$$\mathbf{x}^{n+1} = \mathbf{x}^0 + \mathbf{u}^{n+1} \quad (2.30)$$

Базовою формулою для обчислення прискорень вузлових точок СЕ при апроксимації похідної за часом кінцевими різницями є:

$$\mathbf{a}^n = (\mathbf{v}^{n+0.5} - \mathbf{v}^{n-0.5}) / \Delta t^n \Rightarrow \mathbf{v}^{n+0.5} = \mathbf{v}^{n-0.5} + \Delta t^n \mathbf{a}^n \quad (2.31)$$

При застосування поданих вище формул рівняння (2.23) записується у вигляді:

$$\mathbf{M} \mathbf{a}^n = \mathbf{F}^n; \quad \mathbf{F}^n = \sum_{e=1}^{en} (\mathbf{F}_e^{ext} - \mathbf{F}_e^{int}) \quad (2.32)$$

Прискорення вузлових точок КЕ обчислюються при розв'язку систем лінійних алгебраїчних рівнянь методом обернення матриці $\mathbf{M}$:

$$\mathbf{a}^n = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{F}^n. \quad (2.33)$$

Поточний часовий крок обчислюється за допомогою числа Куранта-Фрідрікса-Леві, яке визначається через рівність:

$$\Delta t \leq \Delta t_{crit} = \min \frac{l_e}{c_e}, \quad (2.34)$$

де c_e – величина, що обчислюється за формулою:

$$c_e = \sqrt{E_e / \rho_e};$$

l_e – крок сітки СЕ.

Для математичного моделювання поведінки об'ємних скляних елементів огорожувальних конструкцій використовується об'ємні гексаедричні СЕ. Розрахункова схема СЕ даного типу наведена на рис. 2.5.

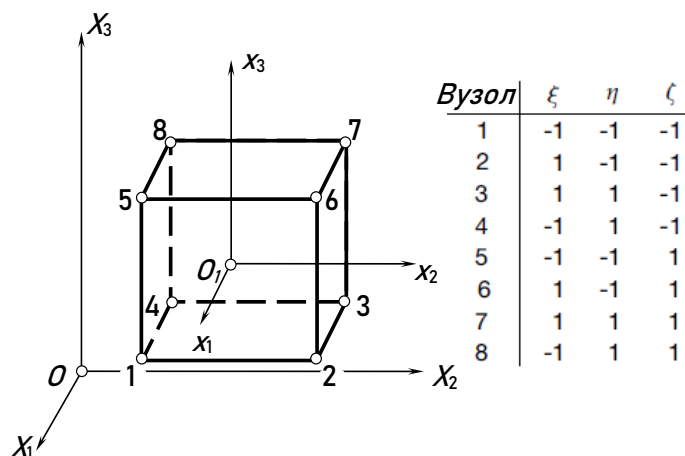


Рис. 2.5 - Розрахункова схема восьмивузлового СЕ типу SOLID.

Для плоских СЕ типу Беличко-Цая [61-63] використано описання динамічної взаємодії через комбінацію обертального та поступального переміщення точок одночасно з врахуванням їхнього деформування. Швидкість деформації СЕ твердого тіла зв'язана із тензором напружень, що дозволяє враховувати нелінійний процес деформування.

При формулюванні геометричних та силових характеристик у плоскому СЕ типу Беличко-Цая застосовується локальна система координат $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$, орти $\hat{e}_1, \hat{e}_2, \hat{e}_3$ для якої розраховуються згідно із розрахунковою схемою, поданою на рис. 2.6 [61-63].

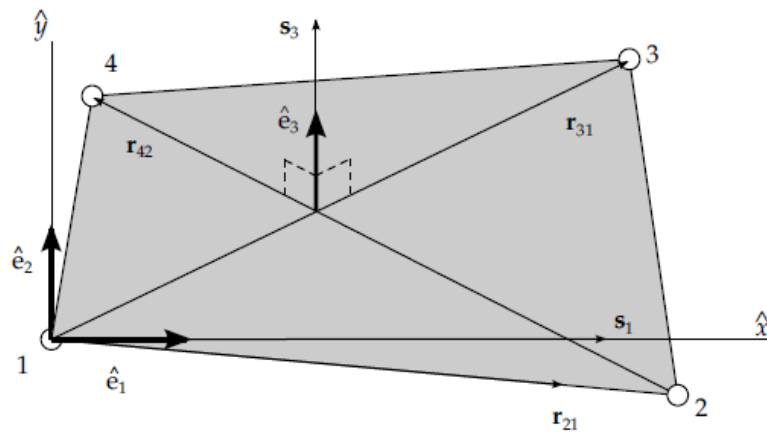


Рис. 2.6 – Схема до визначення геометричних характеристик плоских СЕ типу Беличко-Цая.

Основні співвідношення для плоского СЕ типу Беличко-Цая застосована теорія Міндліна [61-63]. Згідно із нею швидкість точки, що належить СЕ розраховується через формулу:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}^m - \hat{z} \mathbf{e}_3 \times \boldsymbol{\theta}, \quad (2.35)$$

де $\mathbf{v}^m$ – вектор швидкостей серединної точки СЕ;

$\hat{z}$ – поточна координата точки за локальною системою координат;

$\boldsymbol{\theta}$ – вектор обертальної швидкості.

При застосуванні прийнятого температурного режиму критерії R та E вважаються забезпеченими, коли різниця температур на обігрівній та необігрівній поверхнях одного листа або шару скління не перевищує величини термостійкості скла $\Delta\theta_b$. Умову настання граничного стану втрати цілісності, або несучої здатності можна виразити через нерівність:

$$\theta_w - \theta_c \leq \Delta\theta_b = \frac{f_b(1-\mu)}{\beta E_b}, \quad (2.36)$$

де: θ_w – температура на обігрівній поверхні одного листа або шару скління, °C;

θ_c – температура на обігрівній поверхні одного листа або шару скління, °C;

f_b – міцність скла, Па;

E_b – модуль пружності скла, Па;

μ – коефіцієнт Пуассона скла;

β – коефіцієнт терморозширення скла, °C⁻¹.

2.2 Результати обчислювального дослідження поведінки скляних елементів огорожувальних конструкцій

Згідно із гіпотезою подібності, для розрахунку повинен бути використаний температурний режим нагрівання димових газів при пожежі, що подібний до стандартного режиму пожежі, який визначається формулою:

$$\theta_p(t) = 345 \frac{\Theta_{ms} - \theta_0}{\Theta_{max} - \theta_0} \cdot \lg(8t / 60 + 1) + \theta_0, \quad (2.37)$$

Згідно із табл. 7 стандарту [25,] максимальна температура нагрівання димових газів складає $\Theta_{ms} = 600$ °C.

Максимальна температура стандартної пожежі визначається за формулою:

$$\Theta_{max} = 345 \cdot \lg(8t_{max} / 60 + 1) + \theta_0 = 995.665 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.38)$$

де $t_{max} = 84$ хв – час необхідний для здійснення безпечної евакуації, що був отриманий у результаті його розрахункової оцінки за стандартними методами.

При врахуванні необхідного запасу часу для проведення безпечної евакуації приймаємо, що кінцевий час евакуації складає $t_e = 100$ хв. У інтервалі часу за умови, що $t_{max} < t \leq t_e$ температура димових газів постійною і рівна $\Theta = \Theta_{ms} = 600 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Використовуючи викладені положення температурний режим димових газів має вигляд температурної кривої наведеної на рис. 2.7.

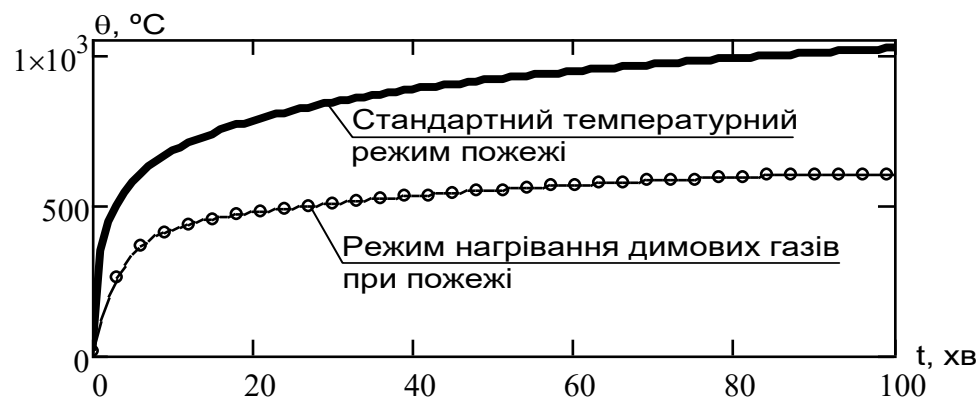


Рис. 2.7 - Температурний режим нагріву димових газів.

При встановленні ГУ важливим є завдання коефіцієнту теплообміну. Нормативами визначено коефіцієнт теплообміну визначати через дві складові – променисту і конвекційну. Промениста складова визначається за законом Стефана-Больцмана:

$$\alpha_p = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{(\theta_p + 273)^4 - (\theta_w + 273)^4}{\theta_p - \theta_w}, \quad (2.39)$$

де ε - ступінь чорноти поверхні скла;

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \text{ К}^4\text{)}$ – константа Стефана-Больцмана

Відповідно до методики розрахунку на границях розрахункової області скляних елементів встановлюються ГУ III роду за рекомендаціями стандарту [10] визначені параметри ГУ, що зведено до табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Значення параметрів граничних умов

Параметр	Позначення	Одиниці вимірювання	Величина	Джерело
Обігрівна сторона				
Коефіцієнту теплообм.	α_c	Вт/(м ² ·°C)	25	[10]
Ступінь чорноти скла	ε		0.8	[10]
Необігрівна сторона				
Коефіцієнт теплообм.	α	Вт/(м ² ·°C)	9	[10]

Для рішення диференціального рівняння теплопровідності має бути задано теплофізичні характеристики скла. Скляний елемент виготовлений із загартованого скла. В табл. 2.3 наведено дані щодо теплофізичних характеристик загартованого скла.

Таблиця 2.3 - Теплофізичні характеристики загартованого скла

Коефіцієнт теплопровідності, λ , Вт/(м·°C)	Питома теплоємність, c_p , Дж/(м ³ ·°C)	Густина, ρ кг/м ³
1,05	950	2500

До елементів скляного огороження шляхів димовидалення, що підлягають обов'язковій оцінці збереження огорожувальної здатності належить секція скляної перегородки що обмежує шлях димовидалення. На рис. 2.8 представлена конструктивна схема даної секції скляної перегородки.

Досліджувана скляна перегородка не є несучою. При розгляді теплової дії димових газів на перегородку огороження шляхів димовидалення згідно із конструктивними схемами приходимо до висновку, що її можна розглядати за схемою одностороннього теплового впливу на нескінченну пластину із певною товщиною. Для вивчення температурних розподілів по перерізу скляного елемента огорожувальної конструкції використана розрахункова методика,

розв'язку диференціального рівняння теплопровідності із граничними умовами (ГУ) III роду детально описана у роботах [47] та висвітлена вище.

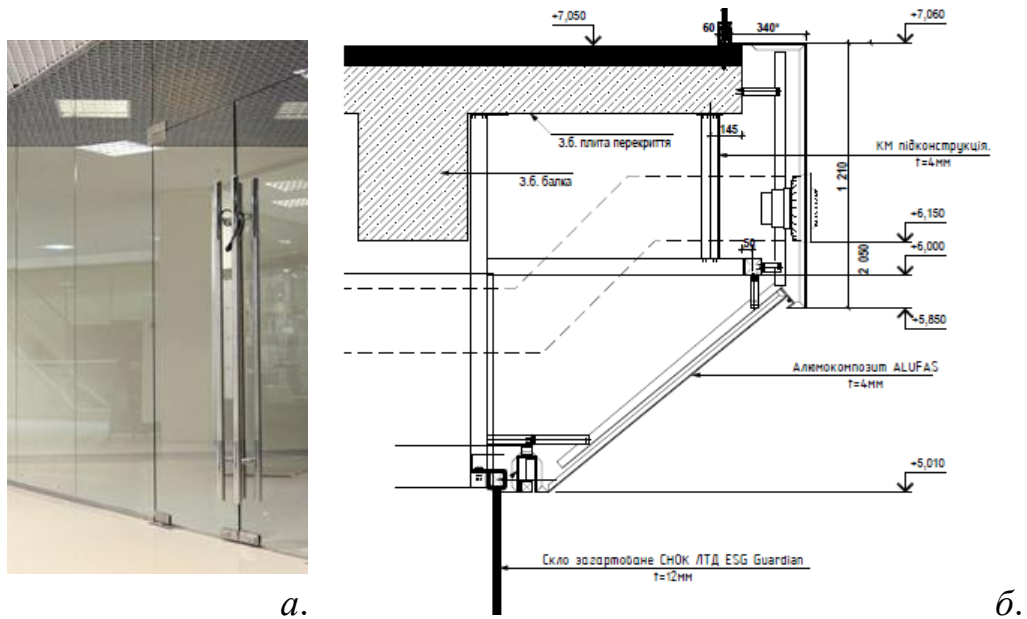


Рис. 2.8 - Конструктивна схема скляного елемента перегородки.

Гранична задача при цьому була поставлена з використанням розрахункової схеми, що подана на рис. 2.9.

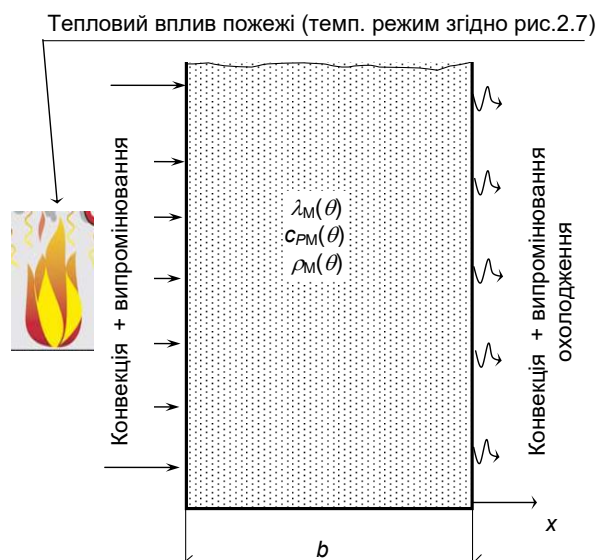


Рис. 2.9 - Розрахункова схема при односторонньому нагріву скляної перегородки.

Для рішення задачі теплопровідності при визначенні температурних розподілів у перерізі досліджуваної протипожежної перегородки використана скінченно-різницева схема, що показана на рис. 2.10.

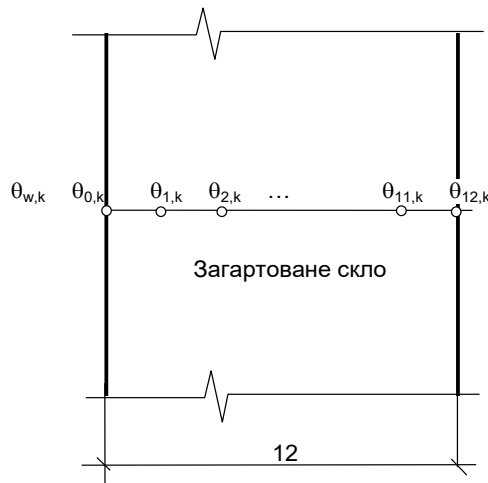


Рис. 2.10 - Скіненно-різницева схема кляного елемента огорожувальної конструкції.

Відповідно до прийнятої розрахункової методики були прийняті такі початкові дані:

- початкова температура $\theta_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- крок сітки $\Delta h = 0.001\text{ м}$;
- крок інтегрування за часом – $\Delta t = 60\text{ с}$.

Тепловий розрахунок було виконано із залученням табличного процесору Microsoft Excel 2003. У результаті здійснення обчислень було отримано дані, які подані на рис. 2.11.

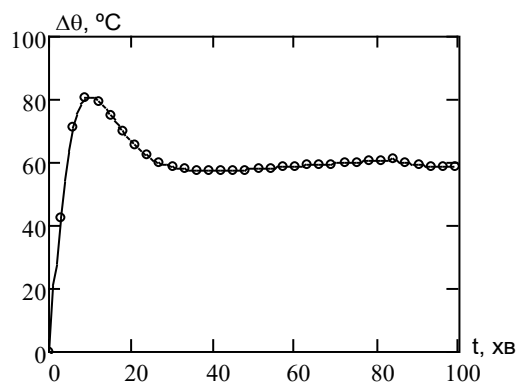


Рис. 2.11 - Залежність різниці температури на обігрівній поверхні та середньої температури перегородки від часу евакуації.

Термостійкість скляної перегородки залежить від механічних та термомеханічних властивостей загартованого скла. Параметри, необхідні для розрахунку подано у табл. 2.4 [130].

Таблиця 2.4 - Основні механічні та термомеханічні властивості загартованого скла

Модуль пружності, МПа	E , МПа	Межа міцності, σ_l , МПа	Коефіцієнт Пуассона, μ	Коефіцієнт терморозширення, α , $^{\circ}\text{C}^{-1}$
$7 \cdot 10^4$		75	0.25	$89 \cdot 10^{-7}$

Максимально допустимий перепад температур визначається за формулою:

$$\Delta\theta_l = \frac{\sigma_l(1-\mu)}{\alpha E} = 90.289^{\circ}\text{C} \quad (2.48)$$

На рис. 2.12 наведено залежність різниці температури на обігрівній поверхні та середньої температури перегородки від часу евакуації на якому відмічено максимально допустиму різницю температур, що визначена за формулою (2.1).

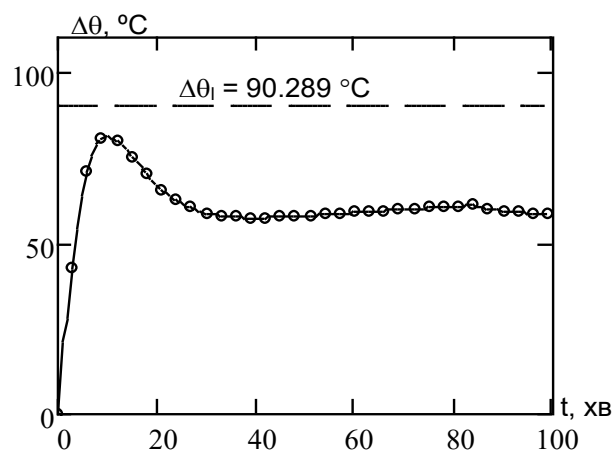


Рис. 2.12 - Залежність різниці температури на обігрівній поверхні та середньої температури перегородки від часу евакуації і максимальне її значення.

Як видно з рис. 2.11 умова термостійкості виконується, отже скляна перегородка зберігає свою огорожувальну здатність протягом всього часу, необхідного для безпечної евакуації.

Також було розраховано температурне розподілення у скляній панелі $1000 \times 1000 \times 3$ при тепловому впливі стандартного температурного режиму пожежі відповідно до розрахункових схем, представлених на рис. 2.9 та рис. 2.10. При цьому розглядалося звичайне віконне силікатне скло. На рис. 2.13 показано температурне розподілення по товщині скляної панелі

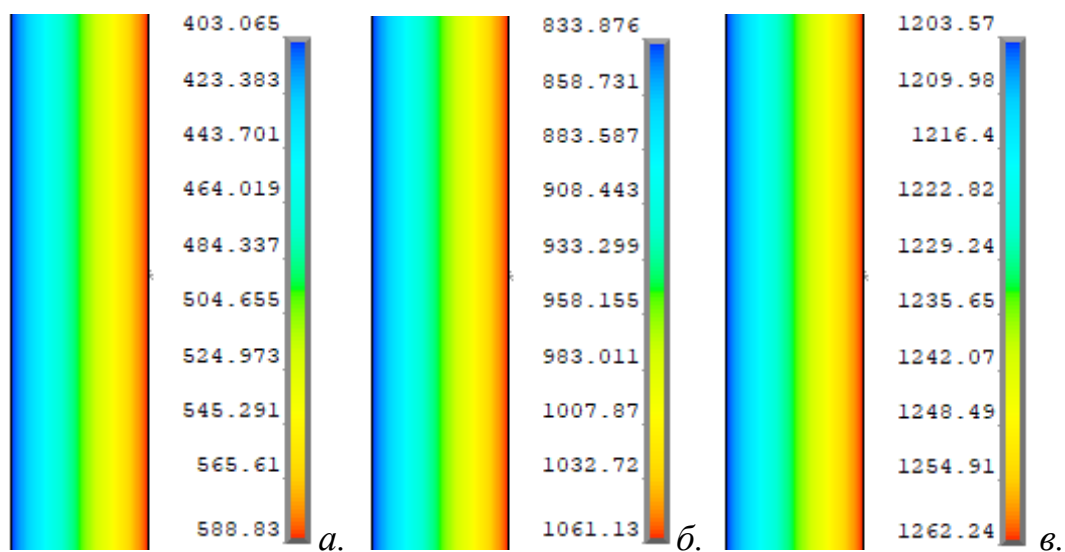


Рис. 2.13 - Температурні розподіли (°C) по перерізу скляної панелі у різні моменти часу перебігу пожежі із стандартним температурним режимом: *а* – 5 хв; *б* – 10 хв; *в* – 20 хв.

На рис. 2.14 наведено графіки температури нагрівання різних точок скляної панелі під тепловим впливом стандартного температурного режиму пожежі, а також графік залежності різниці температур обігрівної та необігрівної поверхонь залежно від часу.

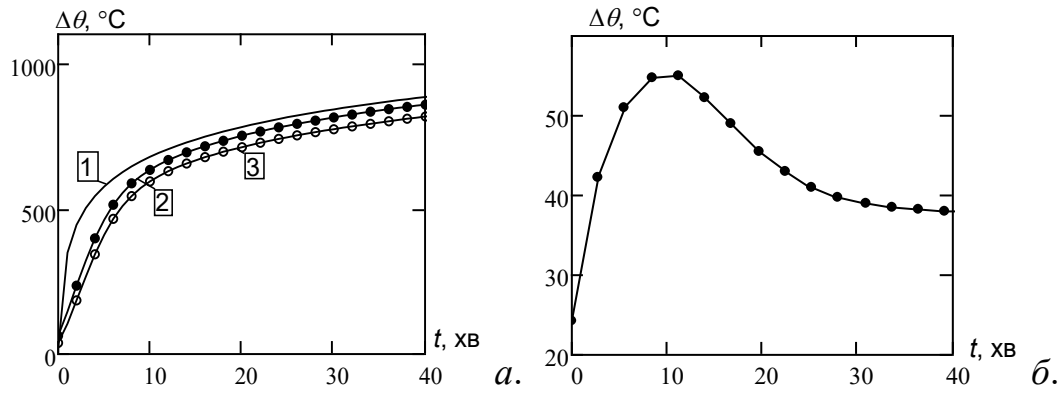


Рис. 2.14 - Графіки температури нагрівання різних точок (а) та графік різниці температур обігрівної та необігрівної поверхонь (б) скляної панелі: 1 – стандартна температурна крива пожежі; 2 – температура обігрівної поверхні; 3 – температура необігрівної поверхні.

За даними рис. 2.14 можна зробити висновок, температурні дані можна використати для розрахунку при рішенні задачі міцності.

Можливо використовувати узагальнені характеристики, що визначають найменшу міцність та найбільшу жорсткість. Рекомендовані величини механічних характеристик подані у табл. 2.5.

Таблиця 2.5 - Узагальнені механічні характеристики конструкційного будівельного скла

Міцність скла, f_b , МПа	Коефіцієнт Пуассона, μ	Термостійкість, $\Delta\theta_b$, °C
40	0.23	48.219

Гранична термостійкість, визначена за даною формулою наведена у табл. 4. Використовуючи це значення можна отримати час руйнування скляної панелі при проведенні даного аналізу. На рис. 2.15 наведений графік зміни різниці температур, на якому відмічена точка настання руйнування скляної панелі при її нагріванні під час теплового впливу пожежі.

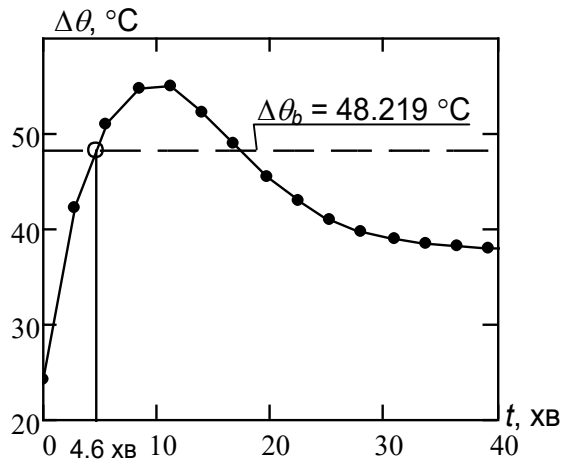


Рис. 2.15 - Графік різниці температур обігрівної та необігрівної поверхонь скляної панелі із граничним значенням термостійкості.

Після проведення розрахунків було отримано температурні дані у внутрішніх шарах панелі скління. Ці дані використовуються в якості початкових даних для математичного моделювання поведінки досліджуваної скляної панелі в умовах теплового впливу пожежі.

Для математичного моделювання використовується система загальних диференціальних рівнянь динаміки та напружено-деформованого стану, що розв'язується числовим способом з використанням явного методу у комбінації із методом скінчених елементів.

Використовуючи припущення, що викладені вище, були розроблені скінчено-елементна схема панелі скління та схема прикладання граничних умов, представлена на рис. 2.16. Можна побачити, що дана схема побудована на основі планарних скінчених елементів тик оболонок Беличко-Цая. При встановленні граничних умов було прийнято спрощувальну гіпотезу, що краї скляної панелі закріплені при введенні шарнірно-рухомих в'язів у кожному вузлі по краях скляної панелі.

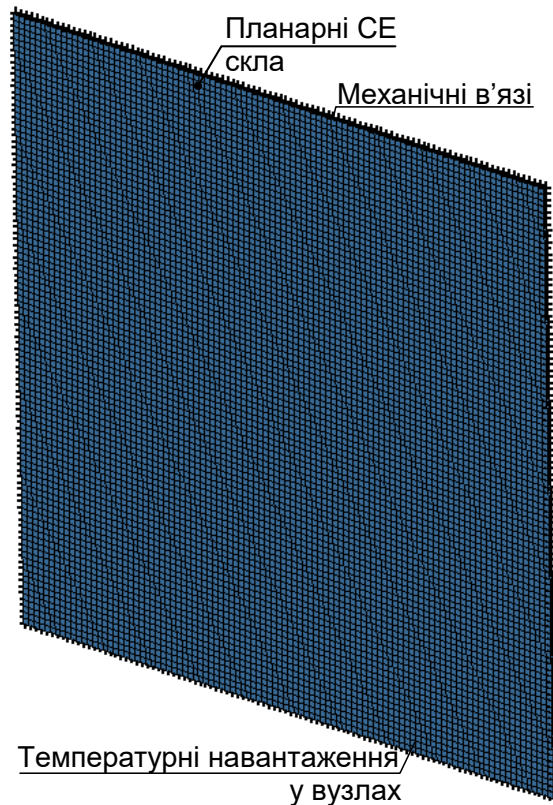


Рис. 2.16 - Скінчено-елементна схема одношарової панелі скління для розв'язку структурної задачі та схема прикладання граничних умов.

У якості навантаження прикладаються температури у вузлових точках, причому вважається, що температура по поверхні панелі розподілена рівномірно з обох сторін. Планарні скінченні елементи типу оболонки Беличко-Цая розглядаються такими, що мають кінцеву товщину. Це дає змогу в кожному вузлі задавати два набори даних щодо температур з обох сторін панелі.

При формулюванні задачі міцності скляної панелі під час теплового впливу пожежі повинні бути враховані температурні залежності механічних та термомеханічних властивостей від температури [130], які показані на рис. 2.17 та подані у табл. 2.6.

Для реалізації уточнених методів потрібно враховувати крихке руйнування скла, застосовуючи відповідну теорію міцності, яка реалізується за моделлю Джонсона-Холмквіста [62].

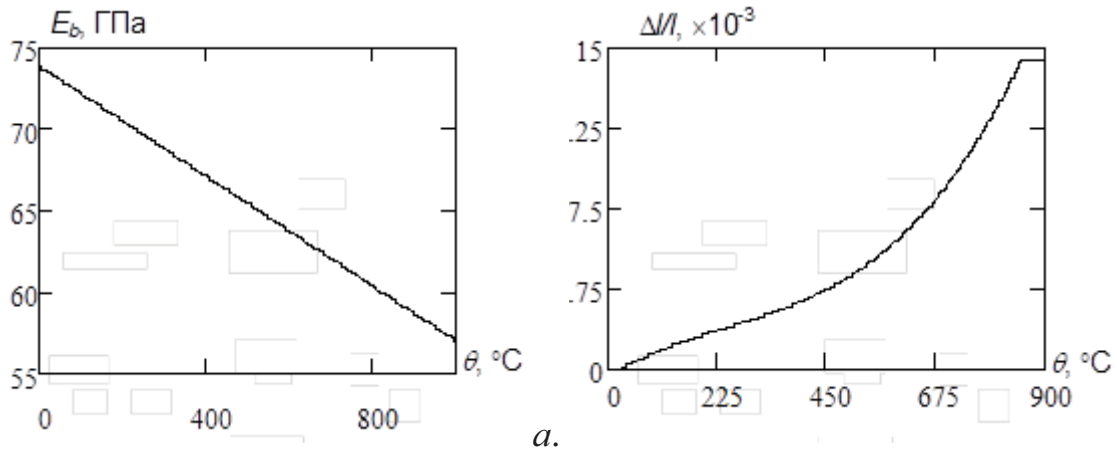


Рис. 2.17 - Термомеханічні характеристики силікатного скла: а – модуль пружності; б – температурна деформація.

Можливо використовувати узагальнені характеристики, що визначають найменшу міцність та найбільшу жорсткість. Рекомендовані величини механічних характеристик подані у табл. 2.6.

Таблиця 2.6 - Температурні залежності термомеханічних характеристик конструкційного будівельного скла

Модуль пружності, ГПа	Температурна деформація
$73.864 - 0.017 \cdot 10^{-2} \theta$	$-2.996 \cdot 10^{-3} + 5.597 \cdot 10^{-6} \theta - 7.155 \cdot 10^{-9} \theta^2$

Для вирішенні задачі міцності були використані результати розв'язку теплотехнічної задачі. Згідно із описаними вище початковими даними та розрахунковими схемами були проведені розрахунки, представлені на рис. 2.18. Тут представлені зображення скляної панелі. Що показують динаміку утворення тріщин під час нагрівання скла в умовах теплового впливу пожежі.

Картина утворення тріщин дозволяє припустити, що повне руйнування панелі відбувається приблизно на 5 хв впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Таким чином, запропонований удосконалений метод оцінювання вогнестійкості скління у світлопрозорих елементах огорожувальних

конструкцій є ефективним і дозволяє визначати значення меж вогнестійкості даних елементів.



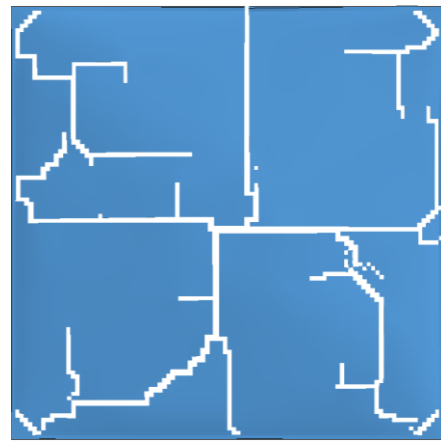
4.52 хв.



4.64 хв.



4.71 хв.



4.92 хв.



5.11 хв.

Рис. 2.18 - Зображення картин утворення тріщин у різні моменти часу перебігу пожежі.

Порівнюючи отримані дані щодо межі вогнестійкості скління уточненим та спрощеним методом бачимо, що вони мають близькі значення, розрізняються не більше за 8 %. Це підтверджує, що отримані результати за уточненим методом є адекватними.

2.3. Висновки до розділу

Для поведінки скління у огорожувальних будівельних конструкціях в умовах пожежі розроблена розрахункова методика, що дозволяє встановити відповідність огорожувальних будівельних конструкцій згідно із нормами, чинними в Україні та Євросоюзі з використанням сучасного науково обґрунтованого підходу. Дана методика була апробована і показала свою ефективність при оцінці вогнестійкості скляної перегородки. При цьому можна зробити такі висновки.

- Обґрунтовано комплекс математичних моделей для симуляції поведінки скляної панелі будівельних огорожувальних конструкцій із світлопрозорими елементами на основі застосування явного метода інтегрування диференціальних рівнянь механіки та метода скінченних елементів.
- На основі проведених розрахунків на основі явного метода та метода скінченних елементів було отримано температурні показники у контрольних точках перерізу та картини розподілення дефектів у скляній панелі, що необхідні для реалізації розрахункового метода оцінювання вогнестійкості скляних елементів будівельних огорожувальних конструкцій. Показано, що вогнестійкість втрачається за умови руйнування скляної панелі на 5 хв теплового впливу пожежі із стандартним температурним режимом.
- Запропонований за результатами досліджень удосконалений уточнений розрахунковий метод може бути застосовуваний як компонент ієрархічної системи методів розрахункового оцінювання даних

елементах, що може бути використана і впроваджена у відповідні нормативні настанови, що будуть рекомендувати дану систему для проектування вогнестійких огорожувальних конструкцій із світлопрозорими елементами.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОВЕДІНКИ СКЛЯНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІД ЧАС ПОЖЕЖІ

3.1. Експериментальне обладнання для здійснення досліджень

Застосований метод досліджень скляних елементів огорожувальних конструкцій заснований на імітації теплової дії пожежі на зразки для досліджень скляних елементів огорожувальних конструкцій із використанням експериментальної установки, яка включає вогневу піч. Система пальників вогневої печі має забезпечувати відтворення стандартного температурного режиму пожежі в її внутрішньому просторі. Температурні показники у просторі печі та у зразках, а також настання граничних станів втрати цілісності та теплоізолювальної здатності фіксуються за допомогою вимірювальних та спостережних засобів.

Конструктивна схема експериментальної установки показана на рис. 3.1.

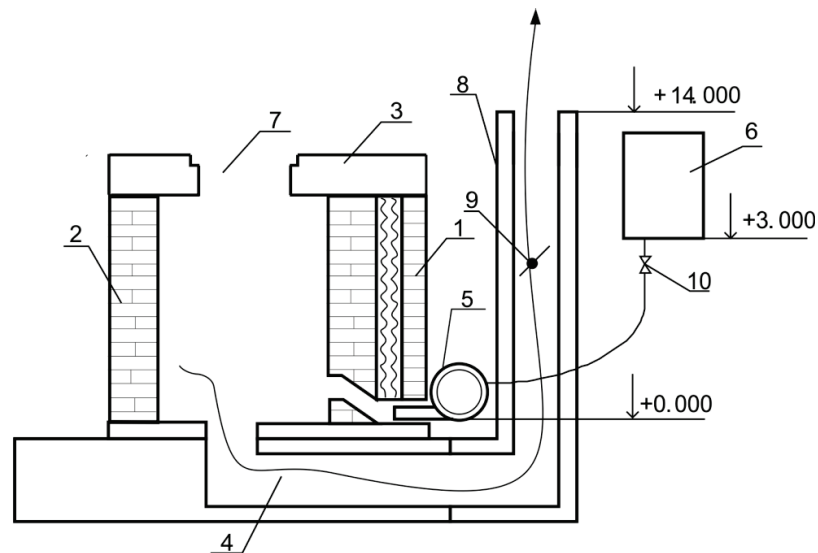


Рис. 3.1. – Конструктивна схема випробувальної установки: 1, 2- огороження печі; 3 –кришка; 4 – димовий канал; 5 –пальник; 6 – ємність з паливом; 7 – вогнева камера; 8 – димовідведення; 9 – дросель газовідводу; 10 – перепускний вентиль

В процесі роботи вогнеої печі паливо живить пальники 5 шляхом його подавання з бака 6 до цих пальників. Температурний режим у внутрішньому просторі вогневої печі 7 регулюється подачою повітряно-паливної суміші з форсунки у нагрівальний канал при використанні вентиля 10. Димові гази вилучаються через димовий канал 4 та шлях димовідведення 8. Контроль вилучення димових газів здійснюється заслокою примусового газовідведення 9. Нагрівання внутрішнього простору вогневої печі здійснюється за рахунок спалювання дизельного палива у пальниках.

Призначення аогневої печі установки для випробувань полягає у проведенні експериментального визначення вогнестійкості фрагментів елементів будівельних конструкцій з вогнезахистом та без нього, кабельних проходок, та інших елементів, для яких такі випробування є актуальними. Параметри та методика проведення експериментів відповідає відповідним вимогам норм, чинних в Україні [7, 8, 22].

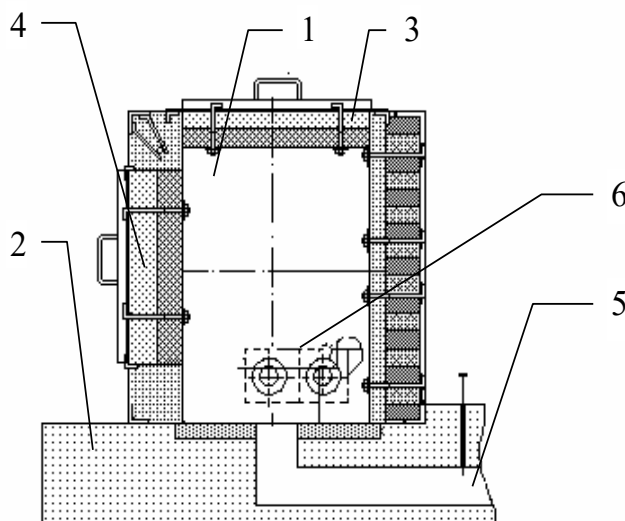


Рис. 3.2 –Вогнева піч для проведення випробувань: 1 – внутрішній простір вогневої печі; 2 – бетонний супорт; 3,4 – теплоізоляційні покриття; 5 – канал відведення димових газів; 6– пальникова система.

Піч має сталевий корпус, розміщений на бетонному супорті 2, що має всередині канал для видалення димових газів.

Внутрішній простір вогневої печі 1 має плитну футеровку з матеріалу з кремнеземистих волокон (ПТКВ-220) та вогнетривкої цегли. Товщина футерування з ПТКВ-220 становить 60 мм. Футеровка вогневої печі при температурі 500 °С має показник теплової інерції рівний $230 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0.5} \text{ м}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Випробування здійснюється при вертикальному положенні випробовуваного фрагмента елементу будівельної конструкції. Установка розташована на науково-випробувальному полігоні ІДУ НД ЦЗ. Конструктивна схема вогневої печі разом із встановленим для здійснення вогневих випробувань дослідного зразку із скляним елементом показана на рис. 3.3.

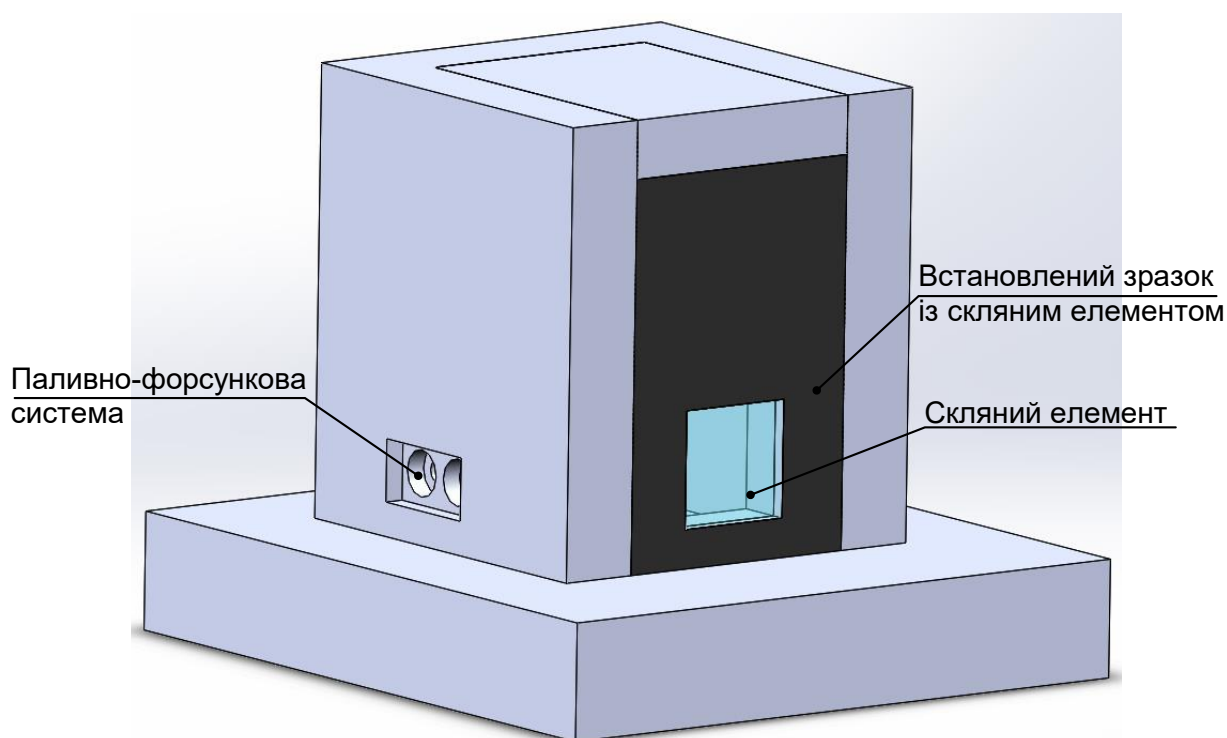


Рис. 3.3 – Схема розташування зразку із скляним елементом в установі для випробувань.

У процесі дослідження залучається експериментальне обладнання, яке включає: установку для вогневих випробувань, що включає вогневу піч (рис. 3.3), вимірювальні засоби (табл. 3.1), спостережне обладнання для здійснення фото та відеофіксації.

Температурні вимірювання у вогневій печі та у дослідних зразках виконується за допомогою вимірювально-інформаційної системи «Термоконт» з модулем фіксації вимірювань «ADAM-508» та п'яти термоелектричних перетворювачів (термопар) із хромель-алюмелевим вимірювальним спаєм. Діаметр дроту спая становить 1.2 мм. Захисний кожух термопар вилучений на довжині $35 \text{ мм} \pm 5 \text{ мм}$ від положення вимірювального спаю. Вимірювання та фіксація температурних показників виконувалося з інтервалом 60 с.

Вимірювання температурних показників на дослідних зразках виконувалося із використанням десяти термопар діаметром дроту вимірювального спаю 0,7; 1,2 мм, які розташовані на необігрівній поверхні скляних елементів зразків та підключені до вимірювальних каналів вимірювально-інформаційної системи «Термоконт». Основні відомості та характеристики вимірювального обладнання подані у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Вимірювальне обладнання

Назва та тип вимірювального засобу	Інтервали вимірювання	Відомості щодо точності вимірювальних засобів
1	2	3
Інформаційно-вимірювальна система «Термоконт»	Від 0 °С до 1200 °С	0,6 %
Термопари ТХА	Від 0 °С до 1200 °С	$\pm 2,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\pm 0,0075 \theta_{\text{вим}}$
Психометр МВ-4М	Від мінус 10 °С до 50 °С; Від 10% до 100 %	$\pm 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\pm 4 \text{ %}$
Хронометр СОС 2Б-2-000	Від 0 до 3600 с;	2 клас точності; $\pm (0,4 \cdot \tau_{\text{вим}} / 60) \text{ с};$ $\pm (0,4 + 1,5 \cdot (\tau_{\text{вим}} - 60) / 3540) \text{ с}$
Барометр	Від 600 мм. рт. ст. до 800 мм. рт. ст.	$\pm 1 \text{ мм рт. ст.}$
Лупа	$\times 5$	Фокусна відстань 62,5мм

3.2 Вимоги для виготовлення зразків

У ході проведення досліджень було використано чотири типи дослідних зразків. Перший тип зразків був призначений для отримання даних щодо нагріву скла та інших матеріалів, які використовуються у скляних елементах огорожувальних конструкцій. На рис. 3.4 показана конструктивна схема зразків першого типу.

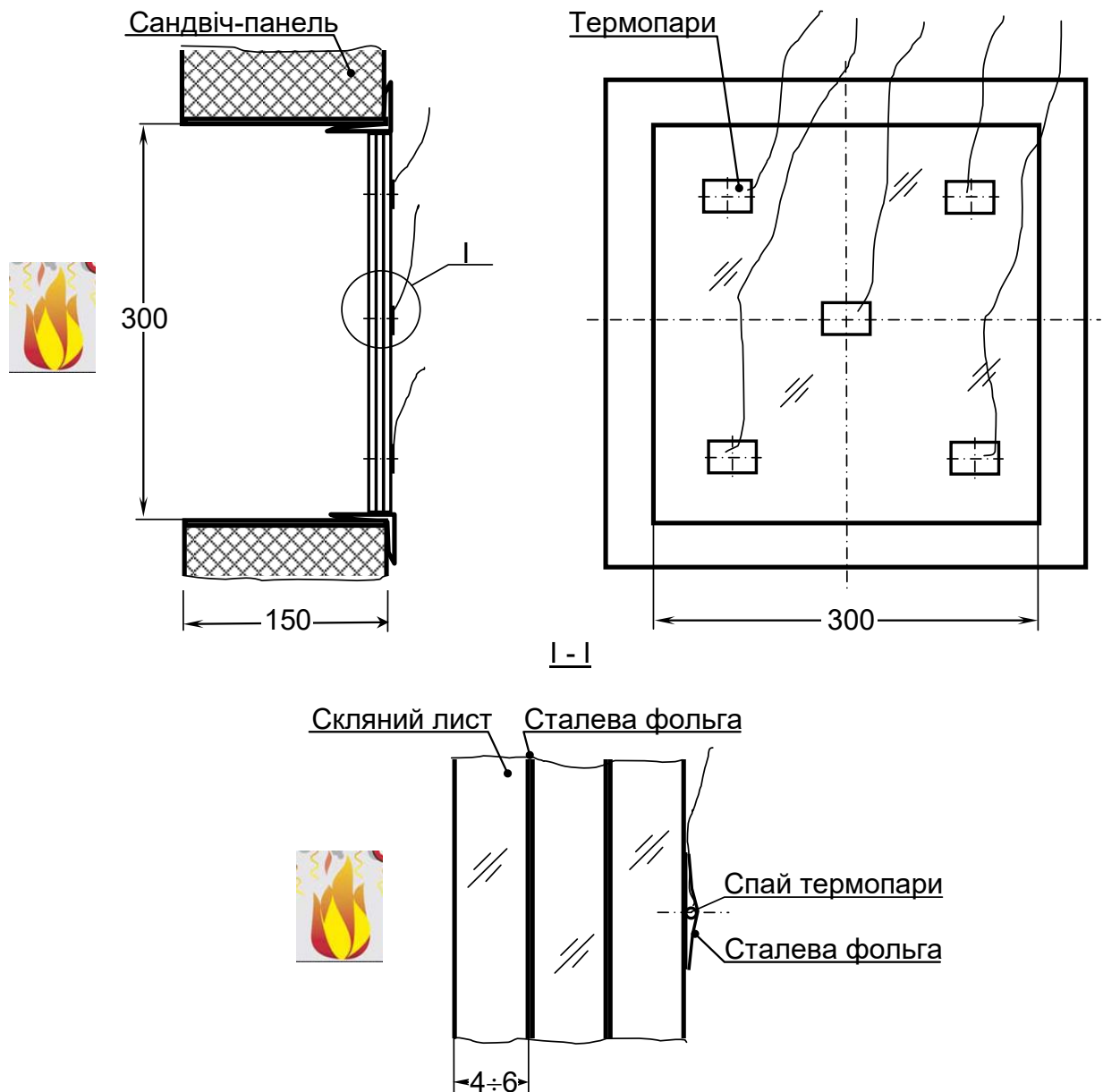


Рис. 3.4 – Схема конструкції зразків першого типу для перевірки та отримання даних щодо нагріву скла та інших матеріалів, які використовуються у скляних елементах огорожувальних конструкцій.

Особливістю даного типу зразків полягає у тому, що вони мають багат шарову структуру і складаються з листів скла товщиною $4\div 6$ мм. Між листами скла розташовуються шари алюмінієвої або сталеві фольги для виключення впливу теплового випромінювання на стики шарів. Спаї термопар захищаються шарами алюмінієвої фольги з тією ж самою метою.

Другий тип зразків призначений для перевірки та отримання додаткових даних щодо отримання даних щодо нагріву шару між листами скла у вогнестійких огорожувальних конструкціях. Конструкція даного типу зразків подана на рис. 3.5.

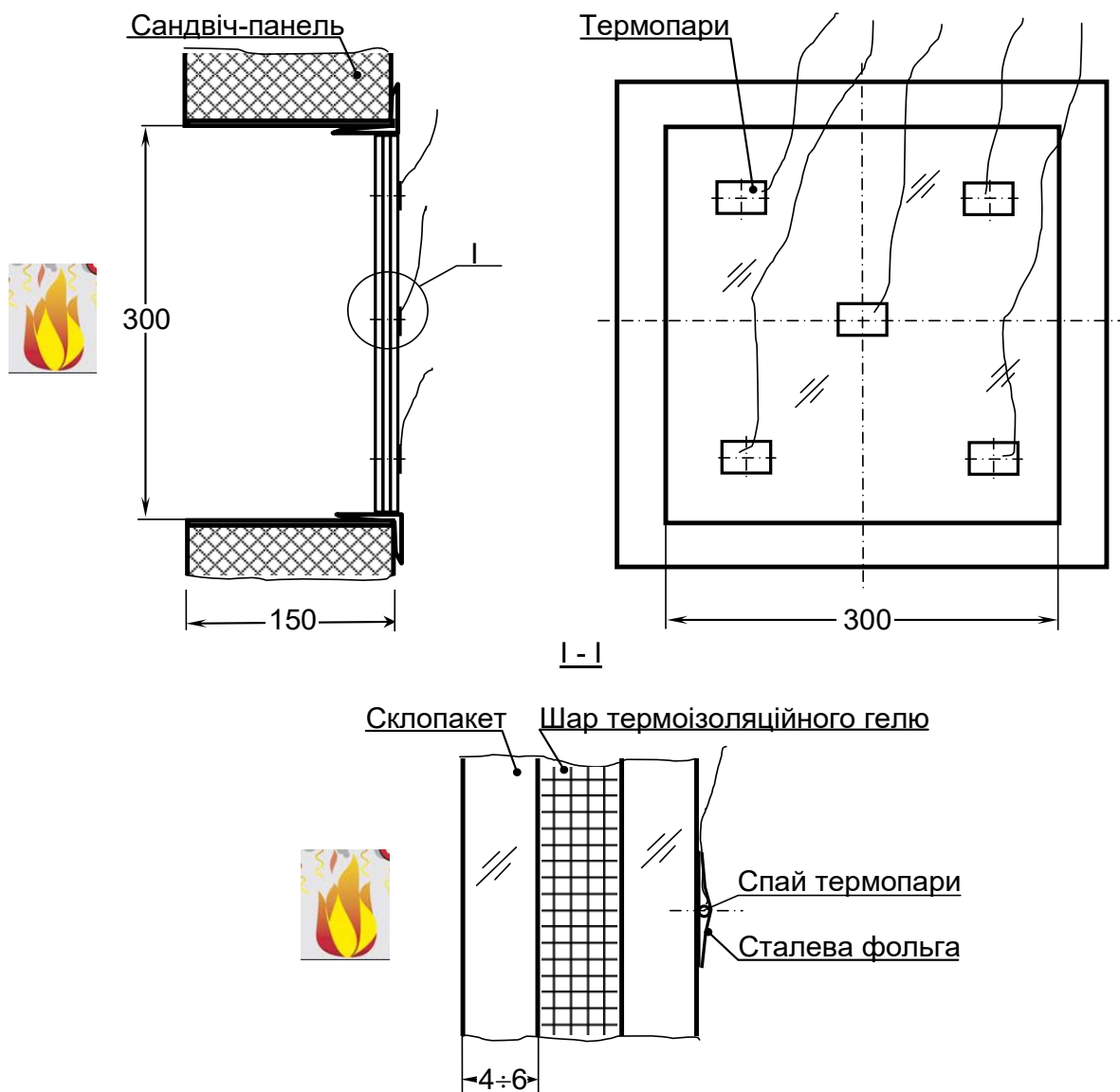


Рис. 3.5 – Конструктивна схема зразків першого типу для перевірки та отримання щодо нагріву шару між листами скла у вогнестійких огорожувальних конструкціях.

Зразки третього типу призначені для перевірки та отримання температурних даних при теплообміні у повітряних порожнинах між склінням. Конструкція даного типу зразків подана на рис. 3.6.

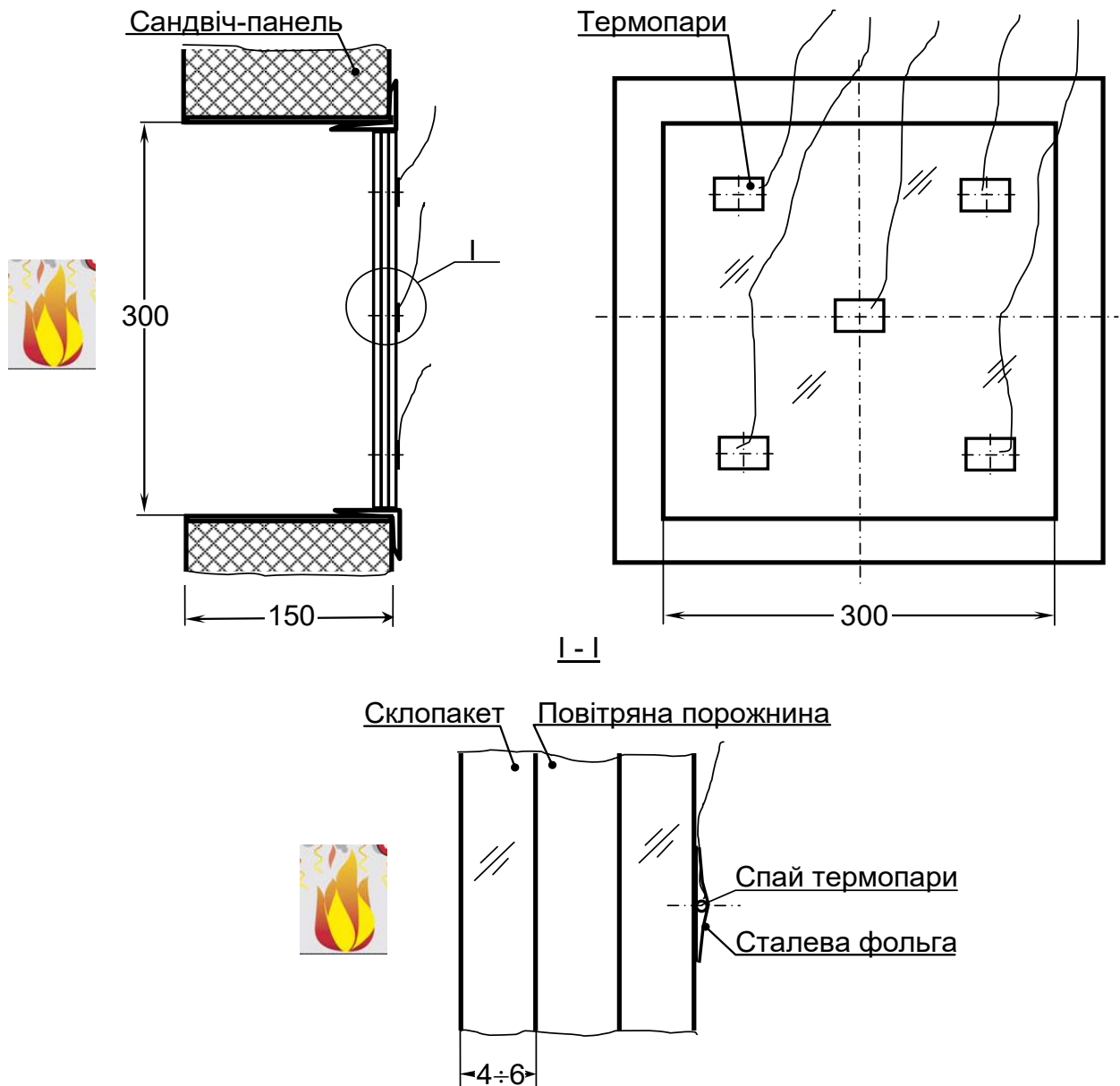


Рис. 3.6 – Конструктивна схема зразків першого типу для перевірки та отримання температурних даних при теплообміні у повітряних порожнинах між склінням.

Зразки четвертого типу призначені для перевірки математичних моделей напружено-деформованого стану скляних панелей під час пожежі. Конструкція

даного типу зразків подана на рис. 3.7.

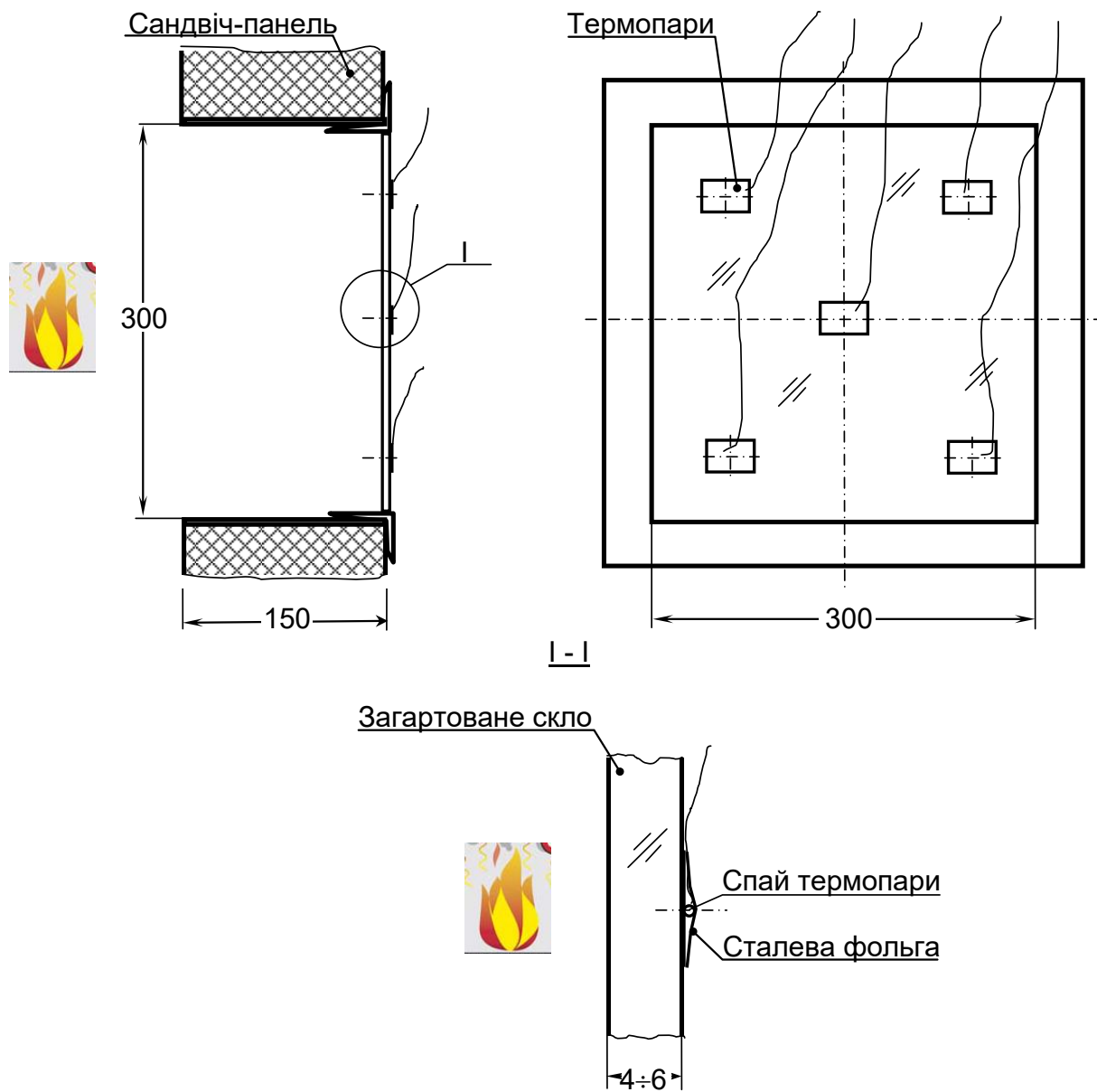


Рис. 3.7 – Конструктивна схема зразків першого типу для перевірки математичних моделей напружено-деформованого стану скляних панелей під час пожежі.

Базовим матеріалом перших двох типів зразків є звичайне віконне силікатне скло, властивості якого наведені у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Фізичні властивості звичайного віконного скла

Параметр	Одиниці виміру	Величина
Густина	кг/м ³	2500
Середня міцність при згині	МПа	40
Модуль пружності	МПа	6.8·10 ⁴
Температура розм'якшення	°C	480
Коефіцієнт лінійного температурного розширення (до 300 °C)	°C ⁻¹	95·10 ⁻⁷
Коефіцієнт теплопровідності	Вт/(м·°C)	0.814
Пропускна здатність для теплового випромінювання	%	87

Матеріалом третього типу зразків є звичайне загартоване силікатне скло, властивості якого наведені у табл. 3.

Таблиця 3.3 – Фізичні властивості загартованого силікатного скла

Параметр	Одиниці виміру	Величина
Густина	кг/м ³	2500
Середня міцність при згині	МПа	200
Модуль пружності	МПа	7.2·10 ⁴
Температура розм'якшення	°C	680
Коефіцієнт лінійного температурного розширення (до 300 °C)	°C ⁻¹	95·10 ⁻⁷
Коефіцієнт теплопровідності	Вт/(м·°C)	0.93
Пропускна здатність для теплового випромінювання	%	87

Для зразка другого типу застосовується вогнестійкий склопакет із термоізоляційним гелем PROMAGLAS виробництва Promat Inc.

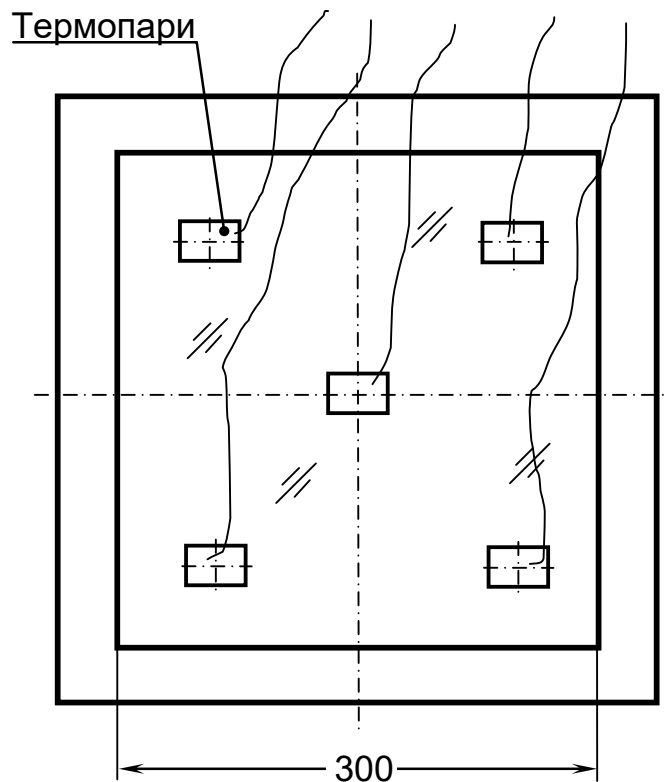
3.3. Методика проведення експерименту

Випробування проводилися з використанням послідовності таких процедур:

1. Процедури підготовки установки до випробувань:

- перевірка закріплення термопар в просторі печі, та їх під'єднання до інформаційно-вимірювальної системи «Термоконт»;
- встановлення термопар у кожному зразку (див рис. 3.8) та їх підключення до інформаційно-вимірювальної системи «Термоконт»;

ндвіч-панель



150

Рис. 3.8. – Схема положення термопар у зразку

- перевірка та налаштування паливкової системи;
- перевірка кондиціонувальної системи;
- Улаштування дослідних зразків в установці для випробувань, заповнення зайвих отворів, що утворюються між зразками та огороженням печі;

- перевірка та налаштування вимірювальних засобів, контрольних приладів та комп'ютерної техніки;

2. Послідовність процедур здійснення експерименту:

- заповнення паливної ємності дизельним паливом;
- під'єднання електродвигуна насосу до електроживлення, вмикання, відкриття вентилію, подавання дизельного палива до пальника з використанням регулятора, запалення форсунок;
- перевірка чутливості термопар, що розташовані в середині печі;
- контроль та регулювання температурного режиму для його максимального наближення до стандартного температурного режиму пожежі за допомогою регулятора;
- фіксація показників температури всередині печі та на дослідних зразках через кожну хвилину за даними всіх термопар, занесення даних вимірювань до протоколу протягом всього процесу нагрівання.

3. Завершальні експериментальні процедури:

- охолодження дослідного зразка;
- фотофіксація дослідного зразка;
- візуальне обстеження дослідного зразка з описанням його;
- оформлення протоколів досліджень та впорядкування отриманих показників вимірювань для їхньої математичної обробки.

3.4 Методика забезпечення теплового режиму випробування зразків

Згідно із стандартами із вимогами щодо вогневих випробувань будівельних конструкцій на вогнестійкість [7, 8, 22] у процесі здійснення випробувань середня температура всередині печі θ_f має відповідати до стандартного температурного режиму пожежі.

Стандартний температурний режим пожежі забезпечується у вогневій печі за допомогою зміни продуктивності подавання палива при контролюванні відповідності показників термопар, що знаходяться всередині камери вогневої

печі. Відхилення не має перевищувати допустимих величин згідно із стандартом [22], що обчислюються з використанням формули:

$$d = 100\% \cdot (\theta_f - \theta_s) / \theta_s \quad (3.2)$$

де θ_s – температурний режим реальної пожежі, °С; θ_f – стандартний температурний режим пожежі, °С.

Таким чином, відхилення d середньої температури у камері вогневої печі θ_f від стандартного температурного режиму не мають перевищувати величин [22]:

- а) $\pm 15\%$для $0 < t \leq 15$ хв.
- б) $\pm 15 - 0,5(t-10)\%$для $15 < t \leq 30$ хв.
- в) $\pm 5 - 0,083(t-30)$для $30 < t \leq 60$ хв.

В процесі проведення випробувань дослідних зразків за показниками окремих термопар після 10 хв випробування допустимі відхилення температури від стандартного температурного режиму пожежі можуть бути не більше 100 °С, як показано на рис 3.9.

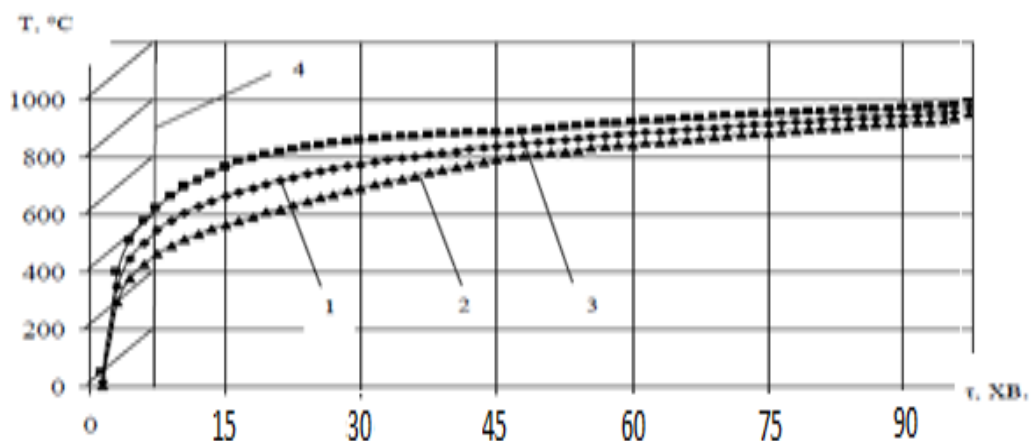


Рис. 3.9 – Допустимі відхилення від стандартного температурного режиму пожежі: 1- стандартна температурна крива пожежі; 2 – крива зміни нижньої допустимої межі; 3 – крива зміни верхньої допустимої межі; 4 – інтервал часу відсутності контролю відхилень середньої температури у камері печі.

Проведення вогневих випробувань виконувалося у відповідності до програми експериментальних досліджень, яка подана у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Програма випробування дослідних зразків

№ п/п	Номер зразка	Кільк.	Тип зразка	Час випр.
1	1.3.1, 1.3.2	2	Зразок 1 типу з трьома шарами скла	60 хв
2	1.4.1, 1.4.2	2	Зразок 1 типу з чотирма шарами скла	
3	2.1.1, 2.1.2	2	Зразок 2 типу (однокамерний склопакет із прошарком термозахисного гелю)	
4	3.1.1, 3.1.2	2	Зразок 3 типу (однокамерний склопакет із повітряною порожниною)	
5	4.1.1, 4.1.2	2	Зразок 4 типу (один шар загартованого силікатного скла)	

Кожений дослідний зразок, зазначений у табл. 3.4, експонується протягом часу, що вказаний для експериментальних випробувань у табл. 3.4, після закінчення встановленого часу, зразок знімається з випробувальної установки. Охолодження зразку відбувається на повітрі. У випадку руйнування зразка випробування припиняється. Після охолодження зразка або його фрагментів відбувається їх візуальний огляд, фотографування та виявлення характеру ушкоджень.

3.5. Висновки до розділу

Для вивчення поведінки скління у огорожувальних будівельних конструкціях в умовах пожежі розроблена експериментальна методика, що дозволяє встановити основні закономірності параметрів теплового впливу на скло в умовах пожежі. При цьому можна зробити такі висновки.

- Для здійснення вогневих випробувань було використано зразки із склінням 300×300 мм, що встановлені у сандвіч панелі із розмірами, відповідними габаритним розмірам прорізу вогневої печі.

- З метою вивчення теплових процесів поширення температури у склінні було використано п'ять типів скляних елементів: багатошарові скляні панелі із звичайного віконного та загартованого скла, фрагменти одно- та дво-камерних склопакетів, а також скляні панелі із прошарком термозахисного гелю.
- Вимірювання температурних показників виконується при використанні п'яти термопар розміщених на необігрівній поверхні скла і закріплені із використанням фольги для зменшення ефекта невідповідності нагрівання поверхні скла та термопар, а також п'яти термопар розміщених у різних токах внутрішнього простору вогневої печі при вогневих випробуваннях.
- Запропонований спосіб встановлення термопар на необігрівній поверхні скла, які закріплені із використанням фольги для зменшення ефекта невідповідності нагрівання поверхні скла та термопар.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ СКЛЯНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІД ЧАС ПОЖЕЖІ

4.1. Результати експериментального вивчення теплового впливу пожежі на зразки скління

Для вивчення впливу пожежі із стандартним температурним режимом пожежі на дослідні зразки скляних елементів огорожувальних будівельних конструкцій, а також дослідження змінювання температурних показників на поверхні дослідних зразків виконано їхні вогневі випробування з використанням методики викладеної у розділі 3.

Під час досліджень було імітовано вплив на скляні елементи огорожувальних конструкцій осередку пожежі, що виникає у приміщеннях, на будівельних об'єктах.

Дослідні зразки, що описані у п. 3.3 попереднього розділу даної роботи розташовувалися відповідно до схеми, показаної на рис. 4.1.

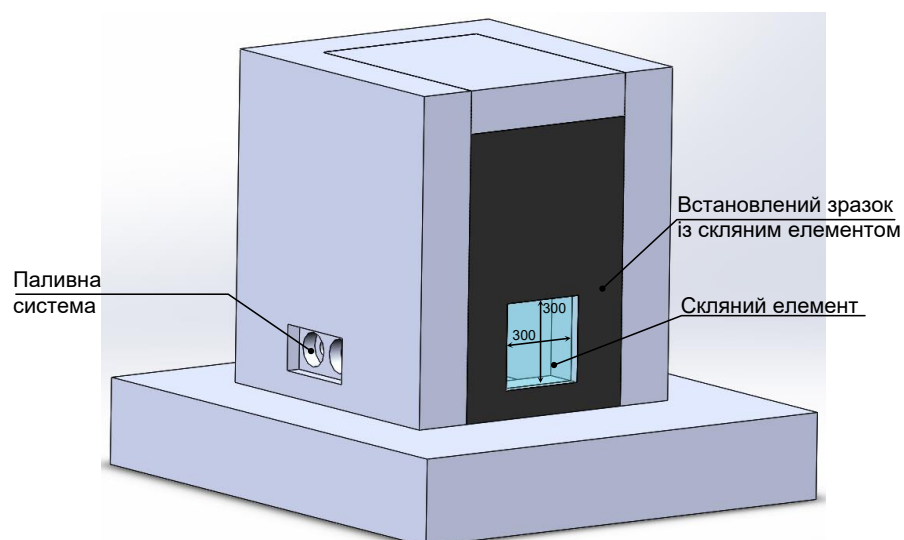


Рис. 4.1 – Схема розташування дослідного зразка у вогневій печі.

На рис. 4.2 зпоказані фотографії процесу встановлення та проведення вогневих випробувань дослідних зразків,.

*а.**б.*

Рис. 4.2 – Фотографії процесу експериментальних досліджень: *а* - улаштування дослідного зразка, що включає три шари звичайного силікатного скла перед проведенням вогневих випробувань, *б* - процес проведення вогневих випробувань.

Під час проведення вогневих випробувань було зафіксовано монотонне зростання температурних показників на необігрівній поверхні дослідних зразків.

Усереднені результати температурних вимірювань під час проведення вогневих випробувань дослідних зразків показані на рис 4.3 - рис. 4.7 кривою блакитного кольору.

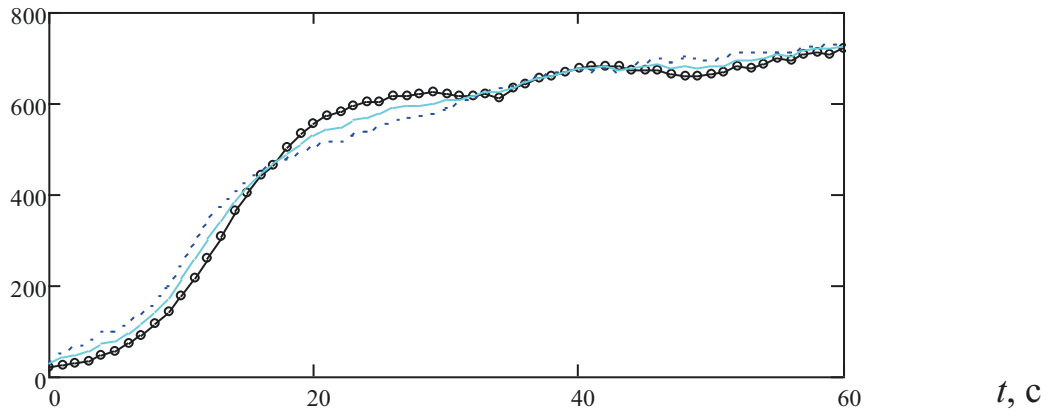
$\theta, ^\circ\text{C}$ 

Рис. 4.3 – Усереднені дані вимірювань експериментальних досліджень зразка із трьома шарами гартованого скла.

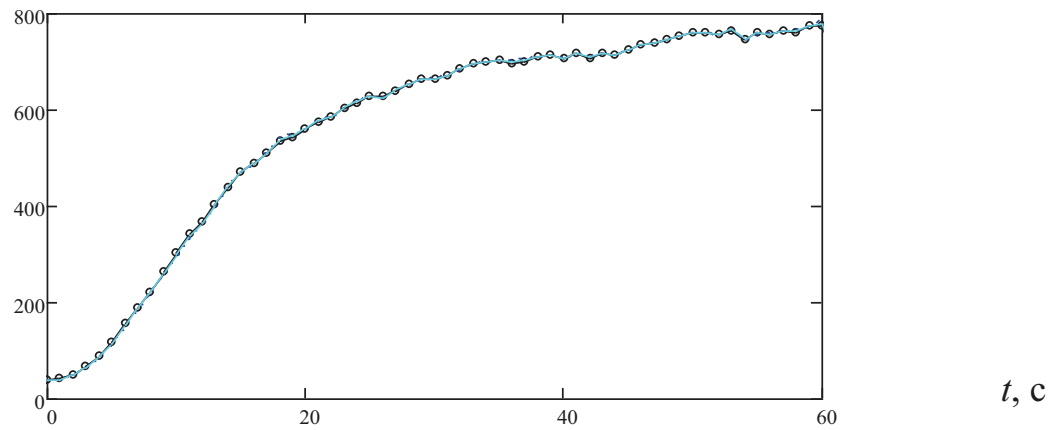
 $\theta, ^\circ\text{C}$ 

Рис. 4.4 – Усереднені дані вимірювань експериментальних досліджень зразка із трьома шарами звичайного силікатного скла.

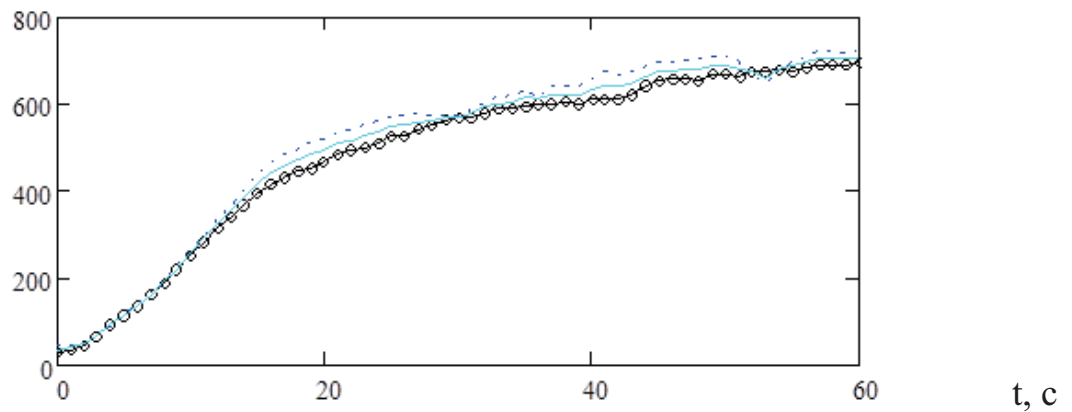
 $\theta, ^\circ\text{C}$ 

Рис. 4.5 – Усереднені дані вимірювань експериментальних досліджень зразка із чотирма шарами звичайного силікатного скла.

$\theta, ^\circ\text{C}$

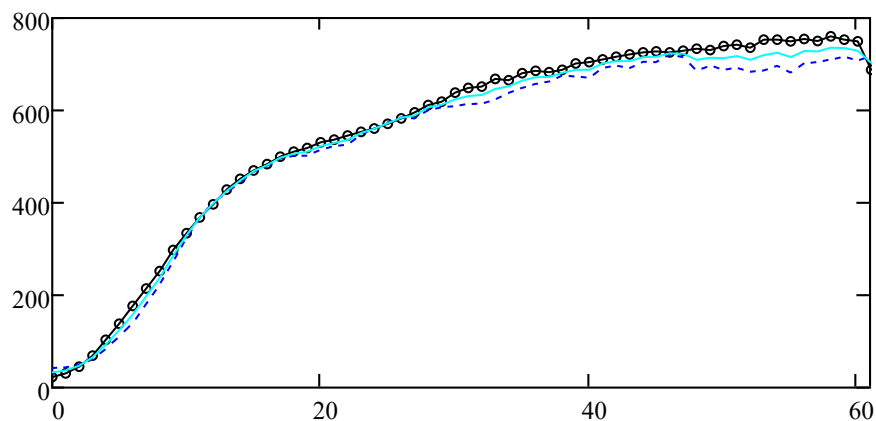


Рис. 4.6 – Усереднені дані вимірювань експериментальних досліджень зразка
однокамерного склопакету.

$\theta, ^\circ\text{C}$

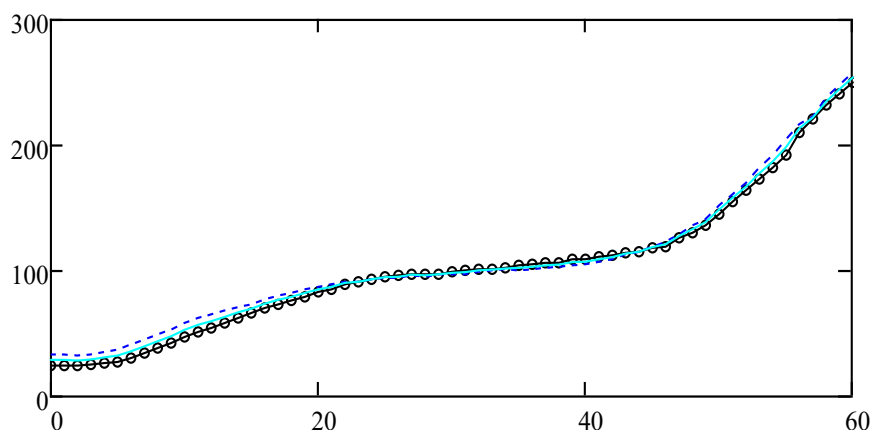


Рис. 4.7 – Усереднені дані вимірювань експериментальних досліджень зразка
спеціального скла із прошарком термотривкого гелю.

Було виконано аналіз отриманих температурних вимірювань щодо наявності викидів і квазिवикидів з використанням статистичного критерію Граббса [85].

Для ідентифікації найбільшого результату у ранжованому ряді як викид або квазिवикид, обчислюється критерій Граббса, $G_{j_{max}}$ з використанням формули [85]:

$$G_{jmax} = \frac{y_{jmax} - \bar{y}_j}{S_j} \quad (4.1)$$

тут $\bar{y}_j$ і S_j - відповідно середнє значення та середньоквадратичне відхилення показників температури.

Для аналізу характеристики значущості відхилення найменшого показника в упорядкованому ряду, y_{jmin} обчислюється критерій Граббса, G_{jmin} з використанням формули [85]:

$$G_{jmin} = \frac{\bar{y}_j - y_{jmin}}{S_j} \quad (4.2)$$

Обчислені у такий спосіб величини G_{jmax} та G_{jmin} порівнюються з 5 % ($G_{кр.5\%}$) та 1 % ($G_{кр.1\%}$) критичними табличними величинами, наведених у роботах [85], що для п'яти експериментальних ситуацій відповідно рівні 1,715 і 1,764.

Якщо при порівнянні G_{jmax} або G_{jmin} з табличними значеннями буде встановлено, що розраховані коефіцієнти перевищують 5 % від критичного значення ($G_{кр.5\%}$) і є меншими або рівними 1 % ($G_{кр.1\%}$) від критичного значення ($G_{кр.1\%}$), в цьому випадку y_{jmax} чи y_{jmin} ідентифікуються як викид або квазівикид відповідно.

Якщо розраховане значення G_{jmax} або G_{jmin} більше 1 %-го критичного значення ($G_{кр.1\%}$), то відповідно y_{jmax} або y_{jmin} вважають викидом.

Якщо розраховані значення G_{jmax} та G_{jmin} є меншими (або рівними) за критичні значення 5% ($G_{кр.5\%}$), то результати випробувань не містять викидів та квазівикидів.

Результати проведеного аналізу наявності у результатів вимірювань під час вогневих випробувань викидів та квазівикидів з використанням критерію Граббса подані на рис. 4.8 – рис. 4.12.

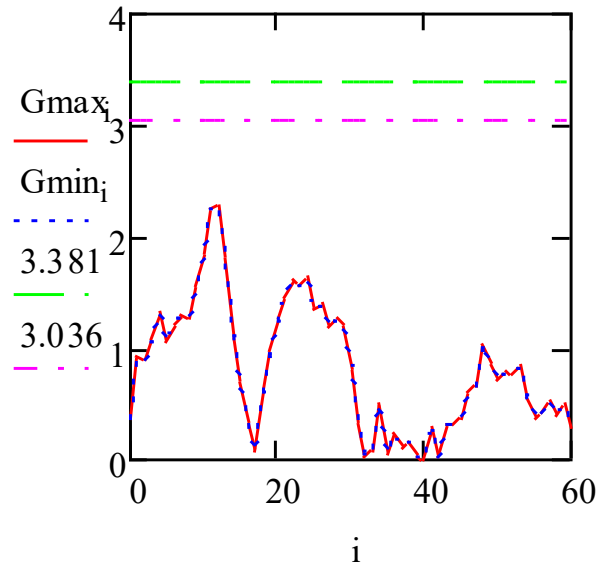


Рис. 4.8 – Результати аналізу наявності викидів і квазівикидів з використанням критерію Граббса для зразка, що складається з трьох шарів гартованого скла для показників термопар $T_{\text{сер}1} - T_{\text{сер}2}$.

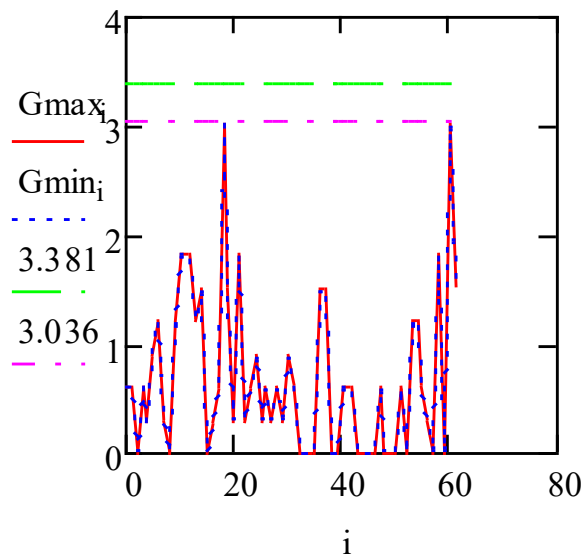


Рис. 4.9 – Результати аналізу наявності викидів і квазівикидів з використанням критерію Граббса для зразка, що складається з трьох шарів звичайного силікатного скла за показниками термопар $T_{\text{сер}1} - T_{\text{сер}2}$.

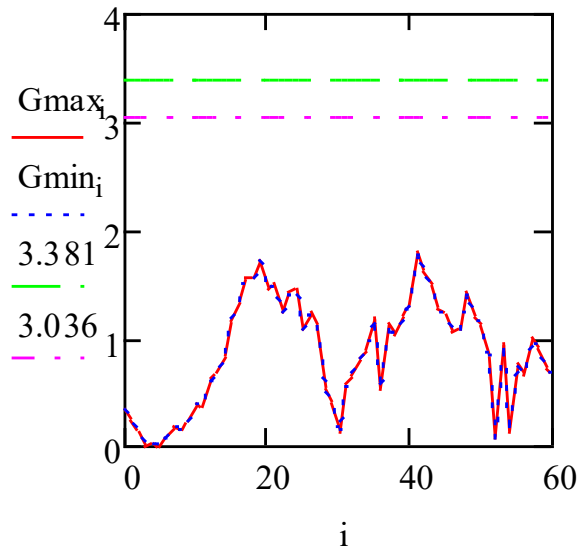


Рис. 4.10 – Результати аналізу наявності викидів і квазівикидів з використанням критерію Граббса для зразків, що складаються з чотирьох шарів звичайного силікатного скла за показниками термопар $T_{\text{сер}1} - T_{\text{сер}2}$.

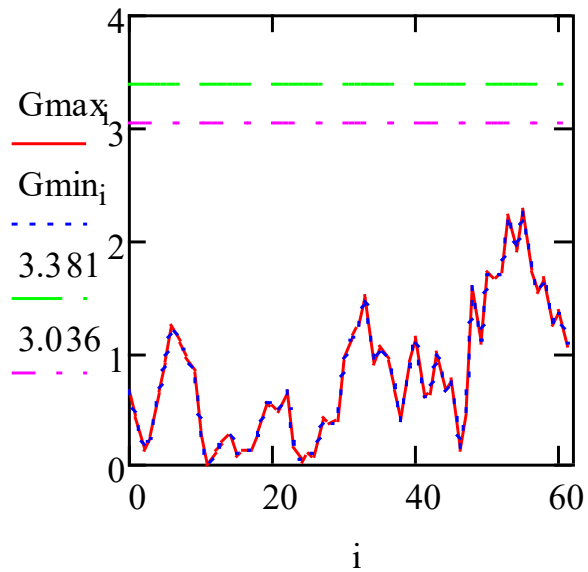


Рис. 4.11 – Результати аналізу наявності викидів і квазівикидів з використанням критерію Граббса для зразка, який представляє собою склопакет значення за показниками термопар $T_{\text{сер}1} - T_{\text{сер}2}$.

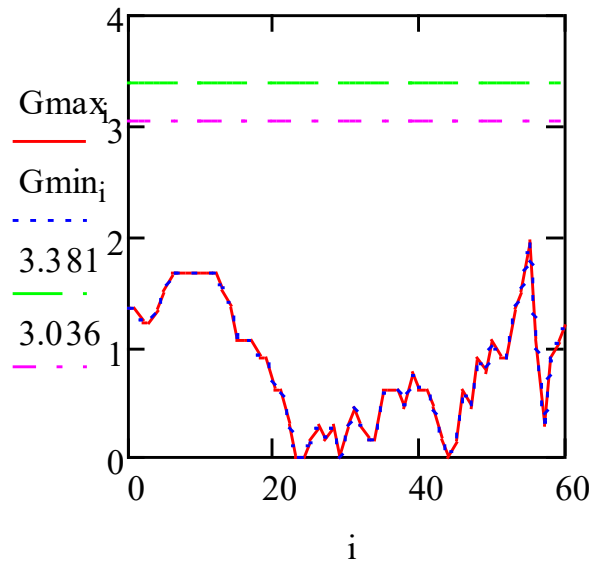


Рис. 4.12 – Результати аналізу наявності викидів і квазिवикидів з використанням критерію Граббса для зразка зі спеціального скла із заповненням термотривким гелем значення за показниками термопар $T_{сер1} - T_{сер2}$.

За результатами, поданими на рис. 4.8 – рис. 4.12 можна зазначити, що результати вимірювань за показниками термопар не включають викиди та квазिवикиди.

Для аналізу адекватності експериментальних даних, розраховані дисперсії відхилень за середніми значеннями термопар з використанням формули [85]:

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|^2}{n} \quad (4.3)$$

де x_i – показник i -го експериментального дослідження;

$\bar{x}$ - середня величина;

n – число експериментальних ситуацій.

Розраховані дисперсії відхилень за середніми величинами показників термопар подані на рис. 4.13.

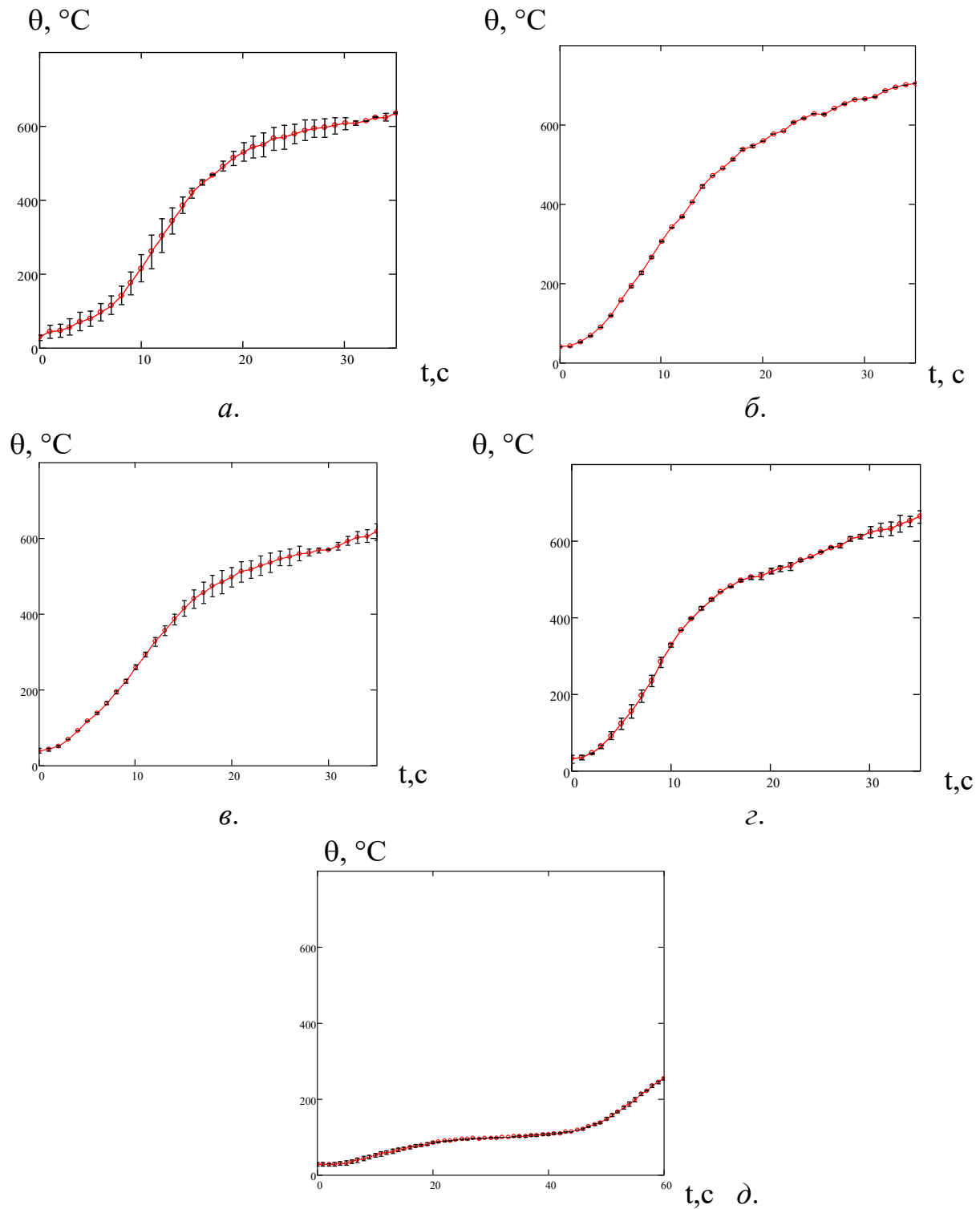


Рис. 4.13 – Графіки дисперсій відхилень за середніми значеннями показників термопар: а – зразок із трьома шарами гартованого скла; б) зразок з із трьома шарами звичайного силікатного скла; в) зразок із чотирьма шарами звичайного силікатного скла; г) зразок, що є фрагментом склопакету; д) зразок зі спеціального скла з шаром вонетривкового гелю.

Для визначення середніх відхилень величини i -го експериментального дослідження від середньої величини для всіх вимірювань було розраховано значення середнього абсолютного відхилення за виразом [85]:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n} \quad (4.4)$$

Для розрахунку середнього відносного відхилення використана формула [68-70, 85]:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n \cdot \bar{x}} \cdot 100\% \quad (4.5)$$

Для обчислення показника дисперсії значень випадкового показника вимірювання (x_i) відносно його математичного очікування ($\bar{x}$) та змінюваності вибірки визначено середньоквадратичне відхилення показників вимірювань за формулою [68-70, 85]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|^2}{n}} \quad (4.6)$$

Розрахункові дані щодо середніх значень абсолютних відхилень, середніх значень відносних відхилень, середніх значень середньоквадратичних відхилень за показниками термопар наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Значення статистичних показників адекватності експериментальних даних

№ п/п	Термопари	Абсолютне відхилення, °C	Відносне відхилення, %	Середньоквадратичне відхилення, °C
1.	Тсер1 та Тсер1.1	16.082	7.346	19.655

Продовження табл. 4.1

2.	T2 та Tсер2.1	1.137	0.35	1.652
3.	T3 та Tсер3.1	15.516	3.329	17.928
4.	T4 та Tсер4.1	12.226	3.41	15.012
5.	T5 та Tсер5.1	2.779	4.368	3.306
Діапазон відхилень		1÷5,5	2÷10,5	1,3÷6,6
Середні значення		9,548	3,761	11,51

Аналіз адекватності експериментальних даних показує, що величини абсолютних відхилень усереднених за вимірюваннями під час проведення вогневих випробувань є не більше за 10 °С, що у відсотках є не більше 15 %, значення середньоквадратичних відхилень знаходяться в межах діапазону 1,3÷6,6 °С, що вказує прийнятну адекватність отриманих розрахункових даних.

Для проведення аналізу дисперсій було висунуто нуль-гіпотезу, тобто припущення, що значення різниці між двома дисперсіями результатів вимірювань рівна нулю, а дані вимірювань є вибірками генеральної сукупності. При цьому коефіцієнт Фішера [68-70, 85] визначається за такою формулою:

$$\frac{S_1^2}{S_2^2} = F, \quad (4.7)$$

де S_1^2 , S_2^2 - середньоквадратичні відхилення для вибірки із найбільшими показниками вимірювань.

Обчислена величина F-критерію порівнювалося із табличним його значенням [68-70, 85]. При статистичній значущості $q\% = 5\%$, 1% і для числа ступенів вільності $k_1 = n_1 - 1$ та $k_2 = n_2 - 1$ встановлюється табличне значення F_{q,k_1,k_2} , що для даної вибірки із п'яти експериментальних ситуацій дорівнює для 5% меж – 6,39, а для 1% меж – 15,98.

Результати визначення критерію Фішера представлені у табл. 4.2

Таблиця 4.2 - Результати перевірки адекватності експериментальних досліджень за критерієм Фішера

№ п/п	Термопара	Табличне значення F-критерію	Розрахункове значення F-критерію
1.	T1сер	5%* - 6,39 1% - 15,98	0,99
2.	T2сер		0,97
3.	T3сер		1
4.	T4сер		0,98
5.	T5сер		0,99

Дані табл. 4.2 показали, що розраховане значення F-критерію менше за табличне значення, то із статистичною вірогідністю 0,95 можна зазначити, що одержані дані температур підтверджують нуль гіпотезу, а їх відхилення можна розглядати як несуттєву.

4.2. Результати експериментального вивчення теплового впливу на зразки скління

З метою перевірки наведених у літературі теплофізичних характеристик були визначені температури на необігрівній стороні скління різних типів. На рис. 4.14 наведені графіки, отримані експериментальним та розрахунковим способом для зразків, що описані у 3 розділі.

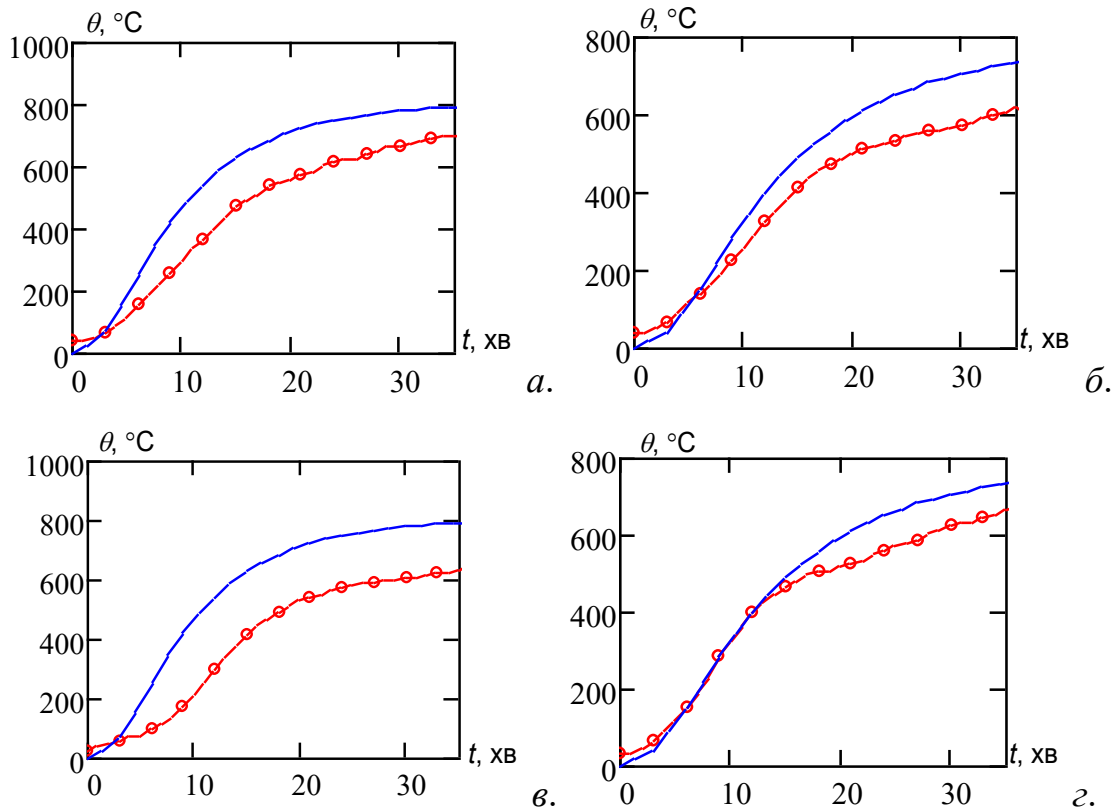


Рис. 4.14 – Розрахункові та експериментальні дані різних типів зразків скління: а) для зразка, що складається з трьох шарів звичайного силікатного скла; б) для зразка, що складається з чотирьох шарів звичайного силікатного скла; в) для зразка, що складається з трьох шарів гартованого скла; г) для зразка, який представляє собою склопакет.

Таблиця 4.6 - Статистичні параметри, отримані при дослідженні адекватності результатів розрахунку температури необігрівної сторони у зразках скління

Кількість ступенів вільності, ν_1	Кількість ступенів вільності, ν_2	Число експериментів, d	Число вимірювань в одному експерименті, n	Дисперсія відтворюваності, $S_{\text{ср}}^2$	Дисперсія адекватності, $S_{\text{ад}}^2$	Обчислене значення F-критерію.	Табличне значення F-критерію. [85].	Середня відносна похибка, %	Середньоквадратичне відхилення, °C
2	124	2	62	0,63	0.598	0,949	6.39	13,8	15,3

Для визначення адекватності результатів математичного моделювання було проведено порівняльний аналіз. У табл. 4.3 наведені відповідні дані.

Дані табл. 4.6 підтверджують прийнятну адекватність даних отриманих розрахунковим шляхом

4.3 Висновки за розділом

У даному розділі показані результати проведених вогневих випробувань, які дозволяють зробити такі висновки.

- Встановлено, що зміна температури на необігрівній поверхні скляних елементів при впливі пожежі із стандартним температурним режимом може бути описана у вигляді регресійних залежностей:

- для зразка з трьох шарів гартованого скла:

$$\theta(t) = -24.365 + 26.426t + 0.355t^2 - 0.024t^3 + 0.00024t^4;$$

- для зразка з трьох шарів звичайного силікатного скла;

$$\theta(t) = 30.49 + 40.313t - 0.576t^2 - 0.0011t^3 + 5.321 \cdot 10^{-5}t^4;$$

- для зразка з чотирьох шарів звичайного силікатного скла:

$$\theta(t) = 16.481 + 34.237t - 0.471t^2 - 0.0014t^3 + 5.322 \cdot 10^{-5}t^4;$$

- для зразка фрагменту склопакету:

$$\theta(t) = 35.039 + 45.675t - 1.67t^2 + 0.0015t^3 - 8.138 \cdot 10^{-5}t^4;$$

- для зразка зі спеціального скла із шаром термотривкого гелю:

$$\theta(t) = 22.292 + 2.182t + 0.159t^2 - 7.694t^3 + 9.294 \cdot 10^{-5}t^4;$$

- Проаналізовано адекватність результатів розрахункового оцінювання вогнестійкості скляної панелі, отриманих при використанні обґрунтованих математичних моделей. У результаті проведеного аналізу показано, що отримані результати є адекватними, оскільки відносна погрішність складає не більше 14 %, а критерій Фішера не перевищує табличного значення.

- 4. Запропонований удосконалений уточнений розрахунковий метод може бути застосовуваний як компонент ієрархічної системи методів розрахункового оцінювання даних елементів, що може бути використана і впроваджена у відповідні нормативні настанови, що будуть рекомендувати дану систему для проектування вогнестійких огорожувальних конструкцій із світлопрозорими елементами.

РОЗДІЛ 5

УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИВЧЕННЯ ПОВЕДІНКИ СКЛЯНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІД ЧАС ПОЖЕЖІ

5.1 Розрахунковий метод оцінювання вогнестійкості скляних елементів огороджувальних конструкцій

5.1.1 Спрощені методи

Шляхом розв'язку задачі теплопровідності визначають температурне поле у перерізі скляної перегородки з огляду на два основних параметри: мінімального часу для здійснення безпечної евакуації та максимальної температури нагрівання димових газів, що виникають при пожежі.

За отриманими температурними розподілами у перерізі скляної перегородки будують графік перепаду температур по товщині перегородки.

Враховуючи конструктивні параметри скляної перегородки та властивостей скла визначають мінімально допустимий перепад температур, при якому ще зберігається її термостійкість.

Перевіряють умову зберігання термостійкості. Отриманий у результаті розрахунків перепад температур не повинен мати значення вище ніж допустиме. При виконанні цієї умови роблять висновок про збереження скляним огородженням своєї огороджувальної здатності.

Для перевірки умови зберігання термостійкості будують графік, приклад якого наведений на рис. 5.1.

Якщо різниця температур протягом контрольного часу перебігу пожежі не перевищує допустимого значення, яке встановлюють показником термостійкості скла, то граничні стани втрати цілісності та несучої здатності не настають.

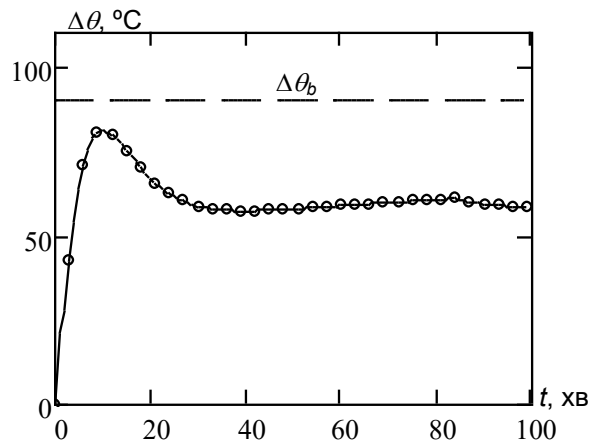


Рис. 5.1 - Залежність різниці температури на поверхні, що обігрівається та середньої температури перегородки від часу перебігу пожежі.

Згідно із прийнятим нами припущенням межа вогнестійкості пов'язана із геометричними параметрами скління з одним шаром скла лінійною поліноміальною залежністю типу [85-87]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2, \quad (5.1)$$

де x_1 , x_2 – фактори, які відповідають початковим параметрам одношарового скління, у нашому випадку це найбільша довжина скління без перемичок та його товщина. Даний тип регресії вибраний за результатами досліджень, наведених у роботах [85-87]

У такому разі, для встановлення регресійної залежності даного типу застосовується матриця плану експерименту, яка має вигляд табл. 5.1.

Таблиця 5.1 - Матриця планування повного факторного експерименту для побудування регресії

№	x_1	x_2	x_1x_2
1	+	+	+
2	+	-	-
3	-	+	-
4	-	-	+

У табл. 5.2 наведені інтервали факторів для здійснення повного факторного експерименту.

Таблиця 5.2 - Інтервали варіювання факторів у повному факторному експерименті

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

Для отримання опорних даних для реалізації повного факторного експерименту були прийняті найбільш поширені конструктивні характеристики залізобетонних пустотних плит. Механічні характеристики бетону та арматурної сталі а також геометричні характеристики арматури наведені у табл. 5.3.

Варіюючи відповідні параметри за матрицею плану за табл. 5.1 за та використовуючи параметри діапазонів варіювання факторів, наведених у табл. 5.2, було одержано дані для здійснення повного факторного експерименту, які наведені у табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Час втрати термостійкості за результатами повного факторного експерименту

Експериментальна ситуація	1	2	3	4
$l_y/l_x = 1,5$				
Час втрати термостійкості, U_e , хв	7	8.5	11	16
$l_y/l_x = 2$				
Час втрати термостійкості, U_e , хв	8	8.8	10	15

При використанні результатів повного факторного експерименту, наведених у табл. 5.4 було обчислено відповідні коефіцієнти регресійної залежності (5.1) за формулами [85-87]:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i ; b_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 y_i ; b_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 y_i ; b_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 y_i . \quad (5.2)$$

де $N = 4$ – число експериментів згідно із планом повного факторного експерименту (див. табл. 5.1);

x_i – величини відповідного фактора згідно із планом повного факторного експерименту та діапазонами їхнього варіювання (див. табл. 5.1 та табл. 5.2);

y_i – час втрати термостійкості за результатами відповідних числових експериментів за табл. 5.4.

При застосуванні формул (5.2), були обчислені коефіцієнти регресії, які зведені до табл. 5.4.

Таблиця 5.4 - Коефіцієнти регресії для визначення межі вогнестійкості залізобетонних пустотних плит за настанням граничного стану втрати цілісності

Коефіцієнти регресії		$b_0,$	$b_1,$	$b_2,$	$b_3,$
Кодовані значення	$l_y/l_x = 1,5$	10.625	-2.875	-1.625	0.875
Реальні величини		22.28125	-2.203125	-1.6875	0.21875
Кодовані значення	$l_y/l_x = 2$	10.45	-2.05	-1.45	1.05
Реальні величини		20.7625	-1.94375	-1.775	0.2625

При вивченні температурних показників та термостійкості скління було застосовано метод описаний у даному розділі. За даними розрахунку було встановлено закономірності, за якими було складено таблиці, які можна використовувати для здійснення оцінки вогнестійкості за табличним методом. Дані таблиці подані нижче.

В таблиці 5.5 визначені геометричні розміри для скління одношарового скла для забезпечення заданого класу вогнестійкості.

Таблиця 5.5 – Геометричні розміри для скління 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
Е 15	$\leq 3,2^*$	$\leq 3^*$	$\leq 2,5^*$	$\leq 3^*$
Е 30	-	-	-	-

*Тільки для загартованого скла

Подібні розрахунки були виконані для однокамерного та двокамерного склопакетів. Отримані дані для проведення повного факторного експерименту, які наведені у табл. 5.6 та табл. 5.7.

Таблиця 5.6 – Значення часу втрати термостійкості при реалізації повного факторного експерименту згідно із прийнятою матрицею планування для однокамерних склопакетів

Експериментальна ситуація	1	2	3	4
$l_y/l_x = 1,5$				
Час втрати термостійкості, U_e , хв	6.5	8	12	15
$l_y/l_x = 2$				
Час втрати термостійкості, U_e , хв	7	8.1	11	15.5

Таблиця 5.7 – Значення часу втрати термостійкості при реалізації повного факторного експерименту згідно із прийнятою матрицею планування для двокамерних склопакетів

Експериментальна ситуація	1	2	3	4
$l_y/l_x = 1,5$				
Час втрати термостійкості, U_e , хв	6.9	9.5	14	16.5
$l_y/l_x = 2$				
Час втрати термостійкості, U_e , хв	7.5	9.8	13	15.5

При застосуванні формул (5.2), були обчислені коефіцієнти регресії, які зведені до табл. 5.8 та табл. 5.9.

Таблиця 5.8 - Коефіцієнти регресії для визначення межі вогнестійкості для скління скла з одним повітряним прошарком

Коефіцієнти регресії (5.1)		b_0 ,	b_1 ,	b_2 ,	b_3 ,
Кодовані значення	$l_y/l_x = 1,5$	10.375	-3.125	-1.125	0.375
Реальні величини		19.90625	-1.890625	-0.9375	0.09375
Кодовані значення	$l_y/l_x = 2$	10.4	-2.85	-1.4	0.85
Реальні величини		21.525	-2.16875	-1.55	0.2125

Таблиця 5.9 - Коефіцієнти регресії для визначення межі вогнестійкості залізобетонних пустотних плит за настанням граничного стану втрати цілісності

Коефіцієнти регресії (5.1)		b_0 ,	b_1 ,	b_2 ,	b_3 ,
Кодовані значення	$l_y/l_x = 1,5$	11.725	-3.525	-1.275	-0.025
Реальні величини		20.91875	-1.740625	-0.6125	0.00625
Кодовані значення	$l_y/l_x = 2$	11.45	-2.8	-1.2	0.05
Реальні величини		19.325	-1.44375	-0.65	0.0125

В таблиці 5.10 визначені геометричні розміри скла для скління із одним повітряним прошарком (однокамерний склопакет) для забезпечення заданого класу вогнестійкості.

Таблиця 5.10 – Геометричні розміри для скління скла з одним повітряним прошарком

Клас вогнестійкості	Однокамерний склопакет			
	$l_y/l_x \leq 1,5$		$1,5 < l_y/l_x \leq 2$	
	Висота, м	Товщина, мм	Висота, м	Товщина, мм
Е 15	≤ 5	≤ 6	≤ 5	≤ 6
Е 30	$\leq 0,5$	≤ 6	$\leq 2,5$	≤ 6

В таблиці 5.11 визначені геометричні розміри скла для скління із двома повітряними прошарками (двокамерний склопакет) для забезпечення заданого класу вогнестійкості.

Таблиця 5.11 – Геометричні розміри для скління з двома повітряними прошарками

Клас вогнестійкості	Двокамерний склопакет			
	$l_y/l_x \leq 1,5$		$1,5 < l_y/l_x \leq 2$	
	Висота, м	Товщина, мм	Висота, м	Товщина, мм
EI 15/E 15	$\leq 0,5/\leq 5$	$6/\leq 6$	$-/\leq 5$	$-/\leq 6$
E 30	$\leq 0,5$	≤ 6	$\leq 1,5$	≤ 6

5.1.2 Уточнені методи

Уточнені методи застосовують аналіз реальних конструкцій, що піддають вогневому впливу. Вони мають базуватись на фундаментальних теоретичних посиленнях, що дозволяють отримати найбільш достовірні дані про поведінку скляних елементів огорожувальних конструкцій із склінням під час пожежі.

При реалізації уточнених методів слід врахувати:

- температурні залежності теплотехнічних властивостей від температури;
- температурні залежності механічних та термомеханічних властивостей від температури, які наведені на рис. 5.2 та табл. 5.4.

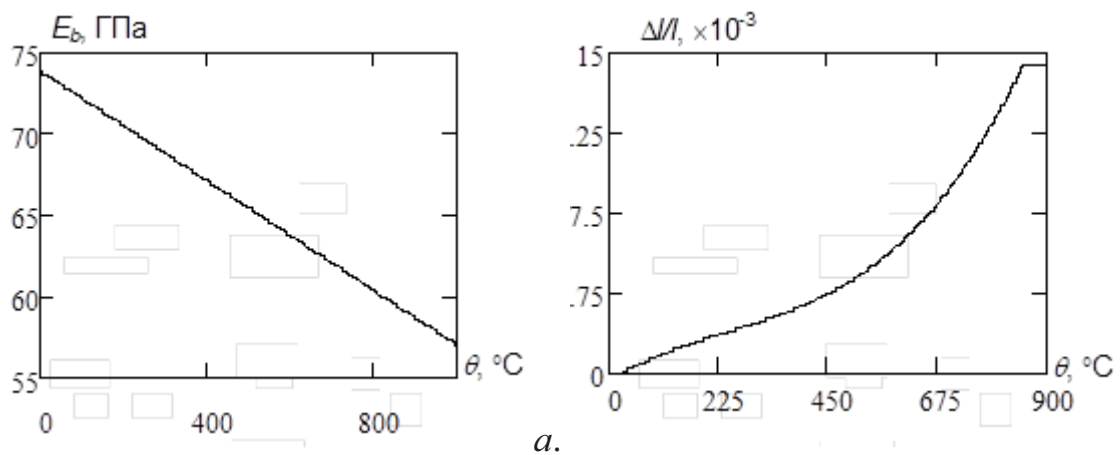


Рис. 5.2. Термомеханічні характеристики силікатного скла: *а* – модуль пружності; *б* – температурна деформація.

Таблиця 5.12 - Температурні залежності термомеханічних характеристик конструкційного будівельного скла

Модуль пружності, ГПа	Температурна деформація
$73.864 - 0.017 \cdot 10^{-2} \theta$	$-2.996 \cdot 10^{-3} + 5.597 \cdot 10^{-6} \theta - 7.155 \cdot 10^{-9} \theta^2$

Для реалізації уточнених методів потрібно враховувати крихке руйнування скла, застосовуючи відповідну теорію міцності.

5.1.3 Теплова задача із врахуванням нагрівання тепловим потоком скла всередині за рахунок теплового випромінювання пожежі

Температурні дані, необхідні для розрахунку під час проектування огорожувальних конструкцій із склінням з урахуванням вимог до вогнестійкості, визначають із використанням нестационарного диференціального рівняння теплопровідності, яке записують у вигляді [64, 88-90]:

$$C_p \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{I}{\ell} \exp(-x/\ell). \quad (5.1)$$

де $\ell = 0.001$ м – довжина затухання променистого теплового потоку у склі;

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

Згідно із розрахунковою схемою (див. рис. 8.1) встановлюють граничні умови, що записують через вирази [64, 88-90]:

$$\text{при } t = 0 \quad \theta = 20 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (5.2)$$

$$\text{при } x = 0 \quad -\lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_k(t)(\theta_p - \theta_w) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot [(\theta_p + 273)^4 - (\theta_w + 273)^4], \quad (5.3)$$

$$\text{при } x = L \quad -\lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=L} = \alpha_{k0}(t)(\theta_n - \theta_0) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot [(\theta_n + 273)^4 - (\theta_0 + 273)^4], \quad (5.4)$$

де $\varepsilon = 0.9$ – ступінь чорноти поверхні скла; $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² С) – константа Стефана-Больцмана.

На рис. 5.3 подана розрахункова схема шару скління.

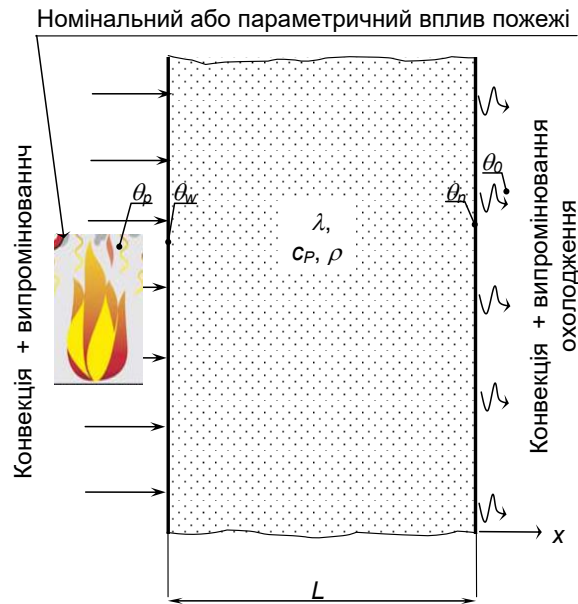


Рис. 5.3. Розрахункова схема до теплотехнічного розрахунку одного шару скління огорожувальної конструкції.

Для виразів (5.2) – (5.4) встановлюють коефіцієнти теплообміну, що записують через вирази [64, 88-90]:

$$\alpha_k(t) = 1.24 \sqrt[4]{\frac{\theta_p - \theta_w}{H_y}}, \text{ якщо } H_y(\theta_p - \theta_w) < 15, \quad (5.5)$$

$$\alpha_k(t) = 1.27 \sqrt[3]{\theta_p - \theta_w}, \text{ якщо } H_y(\theta_p - \theta_w) \geq 15, \quad (5.6)$$

$$\alpha_{k0}(t) = 5 + 0.45(\theta_p - \theta_w), \text{ якщо } \alpha_{k0}(t) \leq 50 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}, \quad (5.7)$$

$$\alpha_{k0}(t) = 50 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}, \text{ якщо } \alpha_{k0}(t) > 50 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}. \quad (5.8)$$

де H_y – найбільший вертикальний розмір однієї секції скління, м.

При розрахунку температур скління із порожнинами теплообмін за рахунок конвекції між скляними поверхнями у порожнині можна враховувати при введенні коефіцієнту теплообміну $\alpha_{\text{int}}=2.5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Теплообмін між внутрішніми поверхнями скління за рахунок теплового випромінювання враховують за допомогою математичної моделі додатку G ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2012 Єврокод 1. Загальні дії. Частина 1-2. Загальні дії на конструкцію під час пожежі.

Теплотехнічні характеристики скла для реалізації даної моделі визначають за табл. 6.1.

5.1.4 Теплова задача із врахуванням нагрівання тепловим потоком скла всередині за рахунок теплового випромінювання пожежі у теплотехнічних характеристиках скла

Температурні дані, необхідні для розрахунку під час проектування огорожувальних конструкцій із склінням з урахуванням вимог до вогнестійкості визначають із використанням нестационарного диференціального рівняння теплопровідності, яке записують у вигляді [85-87]:

$$C_p(\theta)\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right), \quad (5.9)$$

Згідно із розрахунковою схемою (див. рис. 8.1) встановлюють граничні умови, що записують через вирази (5.2) – (5.4).

Для виразів (5.2) – (5.4) встановлюють коефіцієнти теплообміну, що встановлюють за рекомендаціями ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2012 Єврокод 1. Загальні дії. Частина 1-2. Загальні дії на конструкцію під час пожежі.

При розрахунку температур скління із порожнинами теплообмін за рахунок конвекції між скляними поверхнями у порожнині можна враховувати при введенні коефіцієнту теплообміну $\alpha_{\text{int}}=2.5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Теплообмін між внутрішніми поверхнями скління за рахунок теплового випромінювання враховують за допомогою математичної моделі додатку G ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2012 Єврокод 1. Загальні дії. Частина 1-2. Загальні дії на конструкцію під час пожежі.

Теплотехнічні характеристики скла для реалізації даної моделі визначають за табл. 2.3.

5.1.5. Загальні положення щодо розв'язку задачі міцності

Основою для розв'язання задачі міцності є виконання п. 5.2.2, п. 7.1.5 та п. 7.1.6 даного стандарту.

Розрахунок під час проектування огорожувальних конструкцій зі склінням з урахуванням вимог до вогнестійкості для протяжних систем скління визначення термостійкості скла із використанням формули [64, 88-90]:

$$\Delta\theta_b = \left(1 + \frac{s}{H_y}\right) \frac{f_b}{\beta E_b}, \quad (5.10)$$

де s – товщина листа скління, м.

Розрахунок під час проектування огорожувальних конструкцій зі склінням з урахуванням вимог до вогнестійкості за різницею температур у листі скління, різницю температур визначають згідно із формулою:

$$\Delta\theta_b = \theta_{exp} - \theta_{min}, \quad \theta_{exp} = \frac{1}{L} \int_0^L \theta(x, t) dx. \quad (5.11)$$

5.2. Розроблення національного стандарту України стосовно методі розрахункового оцінювання скляних елементів огорожувальних конструкцій

Використовуючи результати проведених досліджень розроблено проєкт першої редакції ДСТУ «Пожежна безпека. Проектування огорожувальних конструкцій із склінням. Вогнестійкість. Основні положення» та пояснювальна записка до нього. Перша редакція проєкту стандарту складається з 9 розділів та одного додатку, а саме:

1. Сфера застосування;
2. Нормативні посилання;
3. Терміни та визначення понять;
4. Позначки та скорочення;
5. Загальні положення;

5.1 Загальний підхід щодо розрахунку під час проектування огорожувальних конструкцій із склінням із урахуванням вимог до вогнестійкості;

5.2 Основні положення розрахунку;

5.3 Тепловий вплив;

6 Властивості скла;

7 Методика розрахунку;

7.1 Спрощені методи;

7.2 Уточнені методи;

8 Методика розв'язку теплотехнічної задачі;

8.1 Теплова задача із врахуванням нагрівання тепловим потоком скла всередині за рахунок теплового випромінювання пожежі;

8.2 Теплова задача із врахуванням нагрівання тепловим потоком скла всередині за рахунок теплового випромінювання пожежі у теплотехнічних характеристиках скла;

9 Методика розв'язку задачі міцності;

9.1 Загальні положення щодо розв'язку задачі міцності;

Додаток А (обов'язковий) Методика визначення граничних умов теплообміну у порожнинах скління

Додаток Б (довідковий) Бібліографія.

Під час розроблення першої редакції проєкту ДСТУ 29.09.2023 року було проведено науково-практичний семінар із залученням представників ІДУ НД ЦЗ за темою: «Розробка методики розрахункової оцінки вогнестійкості огорожувальних конструкцій із скляними елементами в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі» де розробниками стандарту було представлено отримані результати розрахунків та числових експериментів, що проведені на основі розроблених математичних моделей та сформульовано їх роль для подальшого розроблення проєкту національного стандарту України. Представниками семінару за його підсумками було винесено рішення:

- результати проведених розрахунків і експериментальних досліджень оформити окремими розділами за науково-дослідною роботою;
- на основі представленої розрахункової методики підготувати першу редакцію проєкту національного стандарту України та розглянути її на засіданні наукової ради Інституту (додаток В).

Першу редакцію ДСТУ розглянуто на засіданні наукової ради Інституту та на засіданні технічного комітету зі стандартизації ТК 25 «Пожежна безпека та протипожежна техніка» (Протокол від 13.12.2023 №16). За результатами розгляду винесено рішення: «хвалити першу редакцію проєкту

Відповідно до технічного завдання на розроблення стандарту перша редакція була офіційно оприлюднена на сайті національного органу стандартизації.

5.3 Висновки до розділу

За результатом проведених досліджень, викладених в даному розділі можна зробити такі висновки.

- Виявлені закономірності апроксимовані регресійними залежностями часу втрати термостійкості від конструктивних параметрів скління, що мають вигляд:
 - одношарове скло із відношенням сторін, що дорівнює 1.5, $U_e = 22.28125 - 2.203125h - 1.6875l + 0.21875 \cdot h \cdot l$
 - одношарове скло із відношенням сторін, що дорівнює 2, $U_e = 20.7625 - 0.94375h - 1.775l + 0.2625 \cdot h \cdot l$
 - однокамерний склопакет із відношенням сторін, що дорівнює 1.5, $U_e = 19.90625 - 1.890625 h - 0.9375 l + 0.09375 \cdot h \cdot l$
 - однокамерний склопакет із відношенням сторін, що дорівнює 2, $U_e = 21.525 - 2.16875 h - 1.55 l + 0.2125 \cdot h \cdot l$
 - двокамерний склопакет із відношенням сторін, що дорівнює 1.5, $U_e = 20.91875 - 1.740625 h - 0.6125 l + 0.00625 \cdot h \cdot l$
 - двокамерний склопакет із відношенням сторін, що дорівнює 2, $U_e = 19.325 - 1.44375 h - 0.65 l + 0.0125 \cdot h \cdot l$
- Запропонована методика математичного моделювання поведінки скляних елементів огорожувальних конструкцій та умови настання граничних станів втрати їх вогнестійкості в умовах впливу пожежі із стандартним температурним режимом та проведені відповідні розрахунки.
- Запропонований удосконалений метод розрахункового оцінювання вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій на основі запропонованих довідникових таблиць та розроблено проєкт національного стандарту України «Пожежна безпека. Проектування огорожувальних конструкцій із склінням. Вогнестійкість. Основні положення».

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дисертаційних досліджень, одержано рішення актуальної науково-технічної задачі розкриття закономірностей зміни параметрів теплових процесів та напружено-деформованого стану у скляних елементах огорожувальних конструкцій під час пожежі як наукового підґрунтя щодо удосконалення стандартизованих розрахункових методів оцінювання їхньої вогнестійкості. Зокрема можна вказати на такі основні результати:

1. У результаті проведених досліджень статистичних даних щодо пожеж в Україні за останні роки було проаналізовано нормативну базу України та інших країн щодо нормування вогнестійкості огорожувальних конструкцій із скляними елементами показано актуальність задач, пов'язаних із розробкою і удосконаленням розрахункових методів оцінки вогнестійкості скляних елементів огорожувальних конструкцій.

2. Обґрунтовано математичну модель поведінки скляних елементів огорожувальних конструкцій в умовах нагрівання під тепловим впливом пожежі та з її використанням проведені розрахунки температурних показників, параметрів напружено деформованого стану та умов руйнування даних скляних елементів під час пожежі із стандартним температурним режимом

3. Була розроблена методика експериментальних досліджень скляних елементів огорожувальних конструкцій на основі їх вогневих випробувань і з її використанням було виконано експериментальні дослідження їхніх температурних та деформаційних показників при тепловому впливі пожежі із стандартним температурним режимом

4. За допомогою статистичного аналізу показано, що абсолютні відхилення усереднених експериментальних досліджень не перевищують $17\text{ }^{\circ}\text{C}$, що у відсоткових показниках не перевищує 8% , середньоквадратичні відхилення становлять в межах $4\div 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, показники термопар не містять викидів та квазівикидів за критерієм Граббса, критерій Фішера не перевищує табличного значення, що підтверджує адекватність кожного окремого

експериментального дослідження. Показана прийнятна адекватність результатів розрахункового оцінювання вогнестійкості скляних панелей при використанні обґрунтованих математичних моделей, оскільки їхня відносна похибка становить не більше 14 %, а критерій Фішера не перевищує табличного значення.

5. Шляхом проведення повного факторного експерименту виявлено закономірності апроксимовані регресійними залежностями часу втрати вогнестійкості від товщини (h) та найбільшого габаритного розміру (l) скляних елементів, що мають вигляд:

- одношарове скло із відношенням сторін, що дорівнює 1.5, $U_e = 22.28125 - 2.203125h - 1.6875l + 0.21875 \cdot h \cdot l$
- одношарове скло із відношенням сторін, що дорівнює 2, $U_e = 20.7625 - 0.94375h - 1.775l + 0.2625 \cdot h \cdot l$
- однокамерний склопакет із відношенням сторін, що дорівнює 1.5, $U_e = 19.90625 - 1.890625 h - 0.9375 l + 0.09375 \cdot h \cdot l$
- однокамерний склопакет із відношенням сторін, що дорівнює 2, $U_e = 21.525 - 2.16875 h - 1.55 l + 0.2125 \cdot h \cdot l$
- двокамерний склопакет із відношенням сторін, що дорівнює 1.5, $U_e = 20.91875 - 1.740625 h - 0.6125 l + 0.00625 \cdot h \cdot l$
- двокамерний склопакет із відношенням сторін, що дорівнює 2, $U_e = 19.325 - 1.44375 h - 0.65 l + 0.0125 \cdot h \cdot l$

6. Розроблено удосконалений метод розрахункового оцінювання вогнестійкості огорожувальних конструкцій із скляними елементами на основі запропонованих довідникових таблиць, що отримані з використанням виявлених закономірностей, та розроблено проєкт національного стандарту України «Пожежна безпека. Розрахунковий метод визначення вогнестійкості будівельних конструкцій із скляним заповненням. Основні положення».

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ICC (2006), International Building Code, Falls Church, Va.: International Code Council.
2. BSI 96/540493 “The use of Fire Safety Engineering of Buildings” (Draft 27 march 1996)/
3. CEN; EN 1990, Eurocode – Basis of structural design.
4. NFPA (2006), Building Construction and Safety Code, NFPA 5000, Quincy, Mass.: National Fire Protection Association.
5. NBCC (1995), National Building Code of Canada, Ottawa: National Research Council of Canada.
6. ANSI/AISC (2005), “Specification for Structural Steel Buildings,” ANSI/AISC 360-05, American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, Illinois.
7. ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об’єктів будівництва. Загальні вимоги».
8. ISO (1975), Fire Resistance Tests—Elements of Building Construction, ISO 834 – 1975, International Organization for Standardization.
9. ДБН В.1.2-7-2008 «Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об’єктів. Основні вимоги до будівель і споруд пожежна безпека».
10. EN 1991-1-2:2002 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire Part 1-2: General rules - Structural fire design, Brussels, 2002.
11. EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-2: General rules - Structural fire design, Brussels, 2004.
12. EN 1996-1-2:2004 Eurocode 6: Design of masonry structures Part 1-2: General rules - Structural fire design, Brussels, 2004.
13. SNZ (1991), Fire Properties of Building Materials and Elements of Structure,. Miscellaneous Publication No. 9, Wellington: Standards New Zealand.
14. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2012 Загальні дії. Частина 1-2. Загальні дії на конструкцію під час пожежі.— К.: Укрархбудінформ, 2012. – 81 с.

15. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість.— К.: Укрархбудінформ, 2012. – 98 с.

16. - ДСТУ-Н Б EN 1996-1-2:2012 Проектування кам'яних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість.— К.: Укрархбудінформ, 2012. – 78 с.

17. ДСТУ-Н Б.В.2.6-211:2016 Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість.

18. Glass & Glazing Federation, “A guide to best practice in the specification and use of fire-resistant glazed systems 2011. <http://www.ggf.org.uk/publication/FRGbest>.

19. NFPA (2006), “Standard Methods of Tests of Fire Endurance of Building Construction and Materials,” NFPA 251, Quincy, Mass.: National Fire Protection Association.

20. SAA (1990), Fire Resistance Tests of Elements of Structure, AS 1530.4-1990, Standards Association of Australia.

21. ULC (2004), Standard Methods of Fire Endurance Tests of Building Construction and Materials, CAN/ULC-S101-04, Toronto: Underwriters Laboratories of Canada.

22. ДСТУ EN 1363-1:2023 Випробування на вогнестійкість. Частина 1. Загальні вимоги (EN 1363-1:2020, IDT)

23. ДСТУ EN 13381-8:2022 Методи випробування для визначення впливу на вогнестійкість елементів конструкцій. Частина 8. Реактивні вогнезахисні матеріали для сталевих конструкцій (EN 13381-8:2013, IDT)

24. ДСТУ EN 13381-7:2022 Методи випробування для визначення впливу на вогнестійкість елементів конструкцій. Частина 7. Вогнезахисні матеріали для дерев'яних конструкцій (EN 13381-7:2019, IDT)

25. ДБН В.2.6-33:2006 «Конструкції будинків і споруд. Конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією.

26. ДБН В.2.6-31:2006 «Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будинків»

27. ДСТУ ДСТУ CEN/TR 12101-4:2016 Системи протидимного захисту. Частина 4. Побудова систем димо- та тепловидалення (CEN/TR 12101-4:2009, IDT),

28. BIZA: 1996: Fire Safety Concepts Offices and Education Buildings, Ministry of internal affairs, The Hague, the Netherlands. (In Dutch).

29. ASTM (2007), Standard Methods of Fire Tests of Building Construction and Materials, ASTM Standard E119-07a, West Conshohocken, Pa.: American Society for Testing and Materials.

30. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення.

31. ДСТУ EN 13501-1:2022 Пожежна класифікація будівельних виробів і будівельних конструкцій. Частина 1. Класифікація за результатами випробувань щодо реакції на вогонь (EN 13501-1:2018, IDT).

32. ДСТУ EN ISO 11925-2:2022 Випробування щодо реакції на вогонь. Займистість будівельних виробів, що зазнають прямого вогневого впливу. Частина 2.

33. ДСТУ-Н Б EN 1994-1-1:2010 Єврокод 4. Проектування сталезалізобетонних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1994-1-1:2004, IDT).

34. ДСТУ-Н Б EN 1995-2:2012 Єврокод 5. Проектування дерев'яних конструкцій. Частина 2. Мости (EN 1995-2:2004, IDT).

35. ДСТУ-Н Б EN 1999-1-3:2012 Єврокод 9. Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1-3. Конструкції чутливі до витривалості (EN 1999-1-3:2007, IDT). Проект.

36. ДСТУ-Н Б В.2.6-83:2009 Настанова з проектування світлопрозорих елементів огорожувальних конструкцій.

37. Harmathy T.Z. Fire resistance versus flame spread resistance. – Fire Technol., 1976, v. 12, N 4. – P. 290–302.

38. Milke, J.A. (2002), "Analytical Methods for Determining Fire Resistance of Steel Members," SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd ed., DiNenno, ed., Quincy, Mass.: National Fire Protection Association.
39. Mehaffey, C., and T.Z. Harmathy (1984), "Failure Probabilities of Constructions Designed for Fire Resistance," *Fire and Materials* 8:2 (1984) 96-104.
40. 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.
41. Galambos, T.V., et al. (1982), "Probability-Based Load Criteria: Assessment of Current Design Practice," *J. Struct. Div. ASCE* 108:5 (1982) 959-977.
42. Ellingwood, B. (1998), "Reliability-based performance concept for building construction," in *Struct. Engrg. Worldwide, Proc. Struct. Engrg. World Congress 1998*, Elsevier, Paper T178-4 (CD-ROM).
43. Ellingwood, B. (2001), "Acceptable Risk Bases for the Design of Structures," *Progress in Struct. Engrg. and Materials* 3:2 (2001) 170-179.
44. CIB W14 (1983), "A conceptual approach towards a probability-based design guide on structural fire safety," *Fire Safety Journal* 6:1 (1983) 1-79.
45. Bennetts, I.D., and I.R. Thomas, "Design of Steel Structures Under Fire Conditions," *Progress in Struct. Engrg. and Materials* 4:1 (2002) 6-17.
46. Bailey, C.G. (2004), "Membrane Action of Slab/Beam Composite Floor Systems in Fire," *Engrg. Struct.* 26(12): 1691-1703.
47. Поздеев С.В. Развитие научных основ определения пределов огнестойкости несущих железобетонных конструкций: дис. ... докт. техн. наук : 21.06.02 / Поздеев Сергей Валерьевич. – Черкассы, 2012. – 360 с.
48. England, J.P., S.A. Young, M.C. Hui, and N. Kurban (2000), *Guide for the Design of Fire Resistant Barriers and Structures*. Melbourne: Building Control Commission.
49. Feasey, R., and A.H. Buchanan (2002), "Post-flashover Fires for Structural Design," *Fire Safety Journal* 37 (2002) 83-105.

50. Harmathy, T.Z. (1993), *Fire Safety Design and Concrete*, Essex, England: Longman Scientific & Technical.
51. Law, M. (1983), "A Basis for the Design of Fire Protection of Building Structures," *The Structural Engineer* 61A:5 (1983).
52. Lie, T.T. (1992) (ed.), "Structural Fire Protection," ASCE Manuals and Reports of Engineering Practice No 78, New York: American Society of Civil Engineers.
53. Lie, T.T. (2002), "Fire Temperature-Time Relations," Chapter 4-8, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd ed., Bethesda, Md.: Society of Fire Protection Engineers.
54. Magnusson, S.E., and S. Thelandersson (1970), *Temperature-Time Curves of Complete Process of Fire Development: Theoretical Study of Wood Fuel Fires in Enclosed Spaces*, Acta Polytechnica Scandinavica, Civil Engineering and Building Construction Series 65.
55. ГОСТ 33000–2014 "Скло та вироби з нього. Метод випробування на вогнестійкість".
56. Zhukov V. Explosive destruction of concrete. Fire resistance of construction structures. Issue 4, (1976), pp. 42–57.
57. 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.
58. Barthelemy B. Fire resistance of construction structures, (1976), 216 p.
59. Yakovlev A. Calculation of fire resistance of building structures, (1988), 144 p.
60. Lennon, T., Moore, D.B., Wang, Y.K., Bailey, C.G. Guide for designers to EN 1991-1-2:2002, EN 1992-1-2:2002, EN 1993-1-2:2002 and EN 1994-1-2:2002: a guide to the design of fire protection of steel, steel-reinforced concrete and concrete constructions completed and constructed in accordance with Eurocodes: trans. with English / T. Lennon and others; ed. Series H. Gulvanesyan; science ed. trans. V.M. Roitman, I.A. Kirillov, A.I. Plotnikov, (2013), 196 p.

61. Belytschko, T., Chiapetta, R.L. & Bartel, H.D.: Efficient Large Scale Non-Linear Transient Analysis by Finite Elements. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 10 (1976) 1, pp. 579-596.
62. Hallquist, J.O. LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation: California, USA 2005.
63. Bakeer T. Collapse analysis of masonry structures under earthquake actions. Publication Series of the Chair of Structural Design, TU Dresden, 200.
64. A. S. Dmitrichenko. "Calculation of the limit of fire resistance of the translucent structures by criteria of integrity and thermal insulation"
65. K. Machalická, M. Charvátová, M. Eliášová, P. Kuklík. Czech Technical University in Prague. "The behavior of fire resistant glass under fire";
66. A Guide to Best Practice in the Specification and Use of Fire-Resistant Glazed Systems. Glass and Glazing Federation in UK.
67. ДСТУ EN 13501-2:2023 (EN 13501-2:2016, IDT) Пожежна класифікація будівельних виробів і будівельних конструкцій. Частина 2. Класифікація за результатами випробувань на вогнестійкість (крім складників вентиляційних систем).
68. ДСТУ EN 1364-1:2022 (EN 1364-1:2015, IDT) Випробування ненесучих будівельних конструкцій на вогнестійкість. Частина 1. Стіни.
69. ДСТУ EN 1364-3:202_ (EN 1364-3:2014, IDT) Випробування ненесучих будівельних конструкцій на вогнестійкість. Частина 3. Навісні стіни. Повна конфігурація (конструкція в зборі).
70. ДСТУ EN 15998:2022 (EN 15998:2020, IDT) Скло в будівництві. Безпека у випадку пожежі, вогнестійкість. Методологія класифікації випробування скла.
71. EN 15998 Glass in building. Safety in case of fire, fire resistance. Glass testing methodology for the purpose of classification.
72. ДСТУ Б В.2.6-17-2000 (ГОСТ 26602.1-99) Конструкції будинків і споруд. Блоки віконні та дверні. Методи визначення опору теплопередачі.

73. M. Haldimann, A. Luible, and M. Overend, *Structural Use of Glass*, International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), Zurich, Switzerland, 2008, ISBN 978-3-85748-119-2.

74. M. Feldmann, R. Kasper, B. Abeln et al., *Guidance for European Structural Design of Glass Components—Support to the Implementation, Harmonization and Further Development of the Eurocodes*, Report EUR 26439, P. Dimova and D. Feldmann, Eds., Joint Research Centre—Institute for the Protection and Security of the Citizen, Brussels, Belgium, 2014.

75. M. Santarsiero, C. Louter, and A. Nussbaumer, “Laminated connections for structural glass applications under shear loading at different temperatures and strain rates,” *Construction and Building Materials*, vol. 128, pp. 214–237, 2016.

76. J. Belis, C. Bedon, C. Louter, C. Amadio, and R. Van Impe, “Experimental and analytical assessment of lateral torsional buckling of laminated glass beams,” *Engineering Structures*, vol. 51, pp. 295–305, 2013.

77. S. Jordro, M. Pinho, J. P. Martin, A. Santiago, and L. C. Neves, “Behaviour of laminated glass beams reinforced with pre-stressed cables,” *Steel Construction*, vol. 7, no. 3, pp. 204–207, 2014.

78. C. Pascual, J. Montali, and M. Overend, “Adhesively-bonded GFRP-glass sandwich components for structurally efficient glazing applications,” *Composite Structures*, vol. 160, pp. 560–573, 2017.

79. 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.

80. Bansal, N.P. *Handbook of Glass Properties* / N.P. Bansal, R.H. Doremus. – NY.: Academic Press Inc., 1986. –680 p.15. McLellan, G.W. *Glass Engineering Handbook* / G.W. McLellan, E.B. Shand. –NY.: McGrawHill Book Co., 1984. – 484 p.

81. Pozdieiev, Serhii; Nizhnyk, Vadym; Feshchuk, Yurii; Nekora, Valeriia; Nuianzin, Oleksandr; Shnal, Taras. Investigation of the influence of the configuration of the fire furnace chamber on the temperature regime during the implementation of

tests for fire resistance. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, 4(1-112), P. 4–40.

82. Feshchuk, Y., Nizhnyk, V., Nekora, V., Teslenko, O. Improving The System For Responding To Fire In Areas Contaminated By The Chernobyl Disaster. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*, 2022, 1(451), P. 152–158. – 1.

83. Поздєєв, Сергій Валерійович, Некора, Валерія Сергіївна, Некора, Ольга Валеріївна, Ніжник, Вадим Васильович. Дослідження поведінки огорожувальних конструкцій із склінням в умовах теплового впливу вогню. *Вісті Донецького гірничого інституту*. №2 (53), 2023. Р. 83-91. 0.5

84. В. Ніжник, О. Савченко, В. Некора. Теоретичні підходи для дослідження закономірності впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику. «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація», Том 7 № 1 (2023). С. 67-76. – 0.5

85. В.С. Некора. Дослідження умов руйнування скління огорожувальних конструкцій в умовах теплового впливу пожежі. *Комунальне господарство міст*. Том 4 № 185 (2024): Серія: Технічні науки та архітектура. С. 178-185. - 1

86. Valeriia Nekora, Serhii Pozdieiev, Olga Nekora, Svitlana Fedchenko, Vadym Nizhnyk, Alina Novhorodchenko, Taras Shnal. Determining the behavior of a glass panel under heating conditions during a fire. . *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 1 No. 1 (133) (2025): Engineering technological systems (Scopus) - 1

87. Валерія Некора, Сергій Поздєєв, Ольга Некора, Світлана Федченко, Вадим Ніжник, Тарас Шналь. Математичне моделювання поведінки скляної панелі в умовах нагріву при пожежі. Том 8 № 2 (2024): *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. С. 57-73.

88. Cuzzillo, B.R. and Pagni, P.J., “Thermal Breakage of Double-Pane Glazing by Fire,” *Journal of Fire Protection Engineering*, 9, 1-11, 1998.

89. Pagni, P.J., "Causes of the 20 October 1991 Oakland Hills Conflagration," *FireSafety Journal*, 21:4, 331-340, 1993.
90. Pagni, P., J. (2002). Thermal glass breakage. *Proceedings of the Seventh International Symposium on Fire Safety Science*, pages 3–22.
91. P. Wang, Y. Zhang, Y. Wang, J. Sun, L. He, (2012) Dynamic three-dimensional stress prediction of window glass under thermal loading, *International Journal of Thermal Sciences* 59: 152-160
92. Y. Wang, Q. Wang, J. Sun, —Simulating the thermal response of glass under various shading conditions in a fire, 9th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, 2012
93. Siaka Dembele, Ricardo A.F. Rosario, Jennifer X. Wen, (2012) Thermal breakage of window glass in room fires conditions – Analysis of some important parameters, *Building and Environment* 54: 61-70.
94. Z.P. Ni, S.C. Lu, L. Peng, (2012) Experimental study on fire performance of double-skin glass facades, *Journal of Fire Science* 30: 457-472
95. NFPA 555, 2013, Guide on methods for evaluating potential for room flashover
96. Debuyser M, Sjöström J, Lange D, Honfi D, Sonck D, Belis J, Behaviour of monolithic and laminated 24 glass exposed to radiant heating, *Construction and Building Materials*, 2017;130: 212-29.
97. Chow C.L., Numerical studies on smoke spread in the cavity of a double-skin facade, *Journal of Civil Engineering and Management*, 2011;17: 371-92.
98. Kang K, Assessment of a model development for window glass breakage due to fire exposure in a field model, *Fire Safety Journal*, 2009;44: 415-24.
99. Babrauskas V, Glass breakage in fires, *Fire Science and Technology, Inc.* 25 <https://www.doctorfire.com/GlassBreak.pdf>, 2011;22.
100. Wang Y, Wang Q, Sun J, He L, Liew KM, Influence of fire location on the thermal performance of glass façades, *Applied Thermal Engineering*, 2016;106: 438-42.

101. Pope N, Bailey C, Development of a Gaussian glass breakage model within a fire field model, *Fire Safety Journal*, 2007;42: 366-76.
102. Wang Y, Wang Q, Su Y, Sun J, He L, Liew KM, Fracture behavior of framing coated glass curtain walls under fire conditions, *Fire Safety Journal*, 2015;75: 45-58.
103. Zhang Y, Wang Q, Zhu X, Huang X, Sun J, Experimental Study on Crack of Float Glass with Different Thicknesses Exposed to Radiant Heating, *Procedia Engineering*, 2011;11: 710-18.
104. Shirvan KM, Mirzakhani S, Mamourian M, Kalogirou SA, Optimization of effective parameters on solar updraft tower to achieve potential maximum power output: A sensitivity analysis and numerical simulation, *Applied Energy*, 2017;195: 725-37.
105. Ramroth WT, Krysl P, Asaro RJ, Sensitivity and uncertainty analyses for FE thermal model of FRP.
106. Nuzzo R, Statistical errors, *nature*, 2014;506: 150.
107. Skelly, M.J., Roby, R.J., and Beyler, C.L., "An Experimental Investigation of Glass Breakage in Compartment Fires", *J. Fire Protection Engineering*, 3, 25-34, 1991.
108. Y. Wang, Q. Wang, J. Sun, L. He, K. Liew, Thermal performance of exposed framing glass façades in fire, *Mater. Struct.*, 49 (2016) 2961-2970.
109. Q. Wang, Y. Wang, Y. Zhang, H. Chen, J. Sun, L. He, A stochastic analysis of glass crack initiation under thermal loading, *Appl. Therm. Eng.*, 67 (2014) 447-457.
110. Aguilar, J.O., Xamán, J., Olazo-Gómez, Y., Hernández-López, I., Becerra, G., & Jaramillo, O.A. (2017). Thermal performance of a room with a double glazing window using glazing available in Mexican market. *Applied Thermal Engineering*, 119: pp.505-515.
111. Baumgärtner, L., Krasovsky, R.A., Stopper, J., & von Grabe, J. (2017). Evaluation of a solar thermal glass façade with adjustable transparency in cold and hot climates. *Energy Procedia*, 122: pp.211-216.

112. Bedon, C., Zhang, X., Santos, F., Honfi, D., Kozłowski, M., Arrigoni, M., Figuli, M., & Lange, D. (2018c). Performance of structural glass façades under extreme loads – Design methods, existing research, current issues and trends. *Construction and Building Materials*, 163: pp.921-937.
113. Bedon, C. (2017). Structural glass systems under fire: overview of design issues, experimental research, and developments. *Advances in Civil Engineering*, Volume 2017, Article ID 2120570, 18 pages.
114. Bedon, C., & Louter, C. (2018). Thermo-mechanical Numerical Modelling of Structural Glass under Fire - Preliminary Considerations and Comparisons. *Proceedings of Challenging Glass Conference*, vol. 6, pp. 513-524
115. Bedon, C., Honfi, D., & Kozłowski, M. (2018a). Numerical Modelling of Structural Glass Elements under Thermal Exposure. *The 3rd International Electronic Conference on Materials Sciences*.
116. Bedon, C., Pascual Agullo, C., Luna-Navarro, A., Overend, M., & Favoino, F. (2018b). Thermo-mechanical Investigation of Novel GFRP-glass Sandwich Façade Components. *Proceedings of Challenging Glass Conference*, vol. 6, pp. 501-512.
117. Bedon, C., Zhang, X., Santos, F., Honfi, D., Kozłowski, M., Arrigoni, M., Figuli, M., & Lange, D. (2018c). Performance of structural glass façades under extreme loads – Design methods, existing research, current issues and trends. *Construction and Building Materials*, 163: pp.921-937.
118. Ghosh, A., Norton, B., & Duffy, A. (2016). Measured thermal & daylight performance of an evacuated glazing using an outdoor test cell. *Applied Energy*, 177 pp.196-203.
119. Li, D., Li, Z., Zheng, Y., Liu, C., & Lu, L. (2015). Optical performance of single and double glazing units in the wavelength 337-900 nm. *Solar Energy*, 122. pp.1091-1099.
120. Hasselaar, B., & Looman, R. (2007). The climate adaptive skin, the integral solution to the conflict between comfort and energy performance. *Proceedings of CIB World Building Congress 2017*, pp. 1115-1125.

121. Miller, C., Thomas, D., Kämpf, J., & Schlueter, A. (2015). Long wave radiation exchange for urban scale modeling within a Co-simulation environment. *Proceedings of CISBAT 2015*, September 9-11, 2015, Lausanne, Switzerland, pp.871-876.
122. Tofilo, P., & Delichatsios, M. (2010). Thermally induced stresses in glazing systems. *Journal of Fire Protection Engineering*, 20(2): pp.101-116.
123. prEN 13474-1, Glass in Building—Design of Glass Panes—Part 1: General Basis of Design, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2007.
124. NEN 2608, Glass in Building-Requirements and Determination Method, Nederlands Normalisatie Instituut, Delft, Netherlands, 2011.
125. DIN 18008:2010–12, Glass in Building—Design and Construction Rules, German Institute for Standardisation(Deutsches Institut für Normung), Berlin, Germany, 2010.
126. CNR-DT/210, Guide for the Design, Construction and Control of Structures Made of Glass Structural Elements [Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Costruzioni con Elementi Strutturali di Vetro], National Research Council (CNR), Italy, 2013.
127. Z. Malou, M. Hamidouche, N. Bouaouadja, J. Chevalier, and G. Fantozzi, “Thermal shock resistance of a soda lime glass,” *Ceramics–Silikraty*, vol. 57, no. 1, pp. 39–44, 2013.
128. B. Cardenas, N. Leon, J. Pye, and H. D. Garcia, “Design and modeling of high temperature solar thermal energy storage unit based on molten soda lime silica glass,” *Solar Energy*, vol. 126, pp. 32–43, 2016.
129. R. M. J. Bokel, F. A. Veer, and L. Tuisinga, “Fire resistance of glass,” in *Proceedings of Glass Processing Days 2003*, pp. 362-363, June 2003/
130. Nodehi, Z. (2016). Behaviour of structural glass at high temperatures. MSC Thesis, Delft University of Technology, <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A76278819-2c45-4110-8790-19ad87644678/>

131. Wu, C.-W. and Lin, T.-H. (2007). Full-scale evaluations on heat resistance of glass panes incorporated with water film or sprinkler in a room fire. *Building and Environment*, 42(9):3277–3284.
132. Weller, B., Meier, A., and Weimar, T. (2010). Glass-Steel Beams as Structural Members of Facades. *Proceedings of Challenging Glass 2*, pages 517–524.
133. Tempel, L. V. D. (2002). Thermal Conductivity of a Glass : The Empirical Model. *Glass Physics and Chemistry*, 28(3):147–152.
134. Shields, T, J., Silcock, G, W. H., and Flood, M. (2002b). Performance of a Single Glazing Assembly Exposed to Enclosure Corner Fires of Increasing Severity. *Fire and Materials*, 25:123–152.
135. Hassani, S, K., Shields, T, J., and Silcock, G, W. (1994). An Experimental Investigation into the Behaviour of Glazing in Enclosure Fire. *Journal of Applied Fire Science*, pages 303–323.
136. Dembele, S., Rosario, A., F., Wen, J., X., Warren, P., D., and Dale, S. (2008). Simulation of glazing behavior in fires using computational fluids dynamics and spectral radiation modeling. *Fire Safety Science - Proceedings of the 9th International Symposium*, pages 1029–1040.
137. Emmons, H., W. (1988). Window glass breakage by fire. Home Fire Project Technical Report No. 77, Harvard University.
138. Gupta, P. K. (2014). Perspective: Thermodynamics of structural glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, pages 1–7.
139. Haldimann, M. (2006). Fracture strength of structural glass elements: Analytical and numerical modelling , testing and design. PhD thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
140. Harada, K., Enomoto, A., Uede, K., and Wakamatsu, T. (2002). An Experimental Study on Glass Cracking and Fallout by Radiant Heat Exposure. *Fire and Materials*, 25:123–152.
141. Keski-Rahkonen, O. (1991). Breaking of window glass close to fire II: circular panes. *Fire and Materials*, 15:11–16.

142. Parry, R., Wade, C., A., and Spearpoint, M. (2003). Implementing a glass fracture module in the BRANZFIRE zone model. *Journal Fire Protection Engineering*, 13:157–183.
143. Pilette, C., F. and Taylor, D., A. (1980). Thermal stresses in double-glazed windows. *Canadian Journal of Structural Engineering*, 13(4).
144. Rutledge, S. A. (2006). Heat transfer and fire-rated glazing. *Glass magazine*, (February):46–52.

ДОДАТОК А

**Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про
апробацію результатів дисертації**

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. С. Поздєєв, В. Некора, О. Некора, В. Ніжник. Дослідження поведінки огорожувальних конструкцій із склінням в умовах теплового впливу вогню. Вісті Донецького гірничого інституту. №2 (53), 2023. С. 83-91.
<https://doi.org/10.31474/1999-981X-2024-1-82-91> – 0.5.
2. В. Ніжник, О. Савченко, В. Некора. Теоретичні підходи для дослідження закономірності впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику. «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація», Том 7 № 1 (2023). С. 67-76.
<https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.1.67.76> – 0.5
3. В. Некора. Дослідження умов руйнування скління огорожувальних конструкцій в умовах теплового впливу пожежі. Комунальне господарство міст. Том 4 № 185 (2024): Серія: Технічні науки та архітектура. С. 178-185.
<https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-4-185-178-185> – 1
4. В. Некора, С. Поздєєв, О. Некора, С. Федченко, В. Ніжник, Т. Шналь. Математичне моделювання поведінки скляної панелі в умовах нагріву при пожежі. Том 8 № 2 (2024): Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація». С. 57-73.
<https://doi.org/10.31731/2524.2636.2024.8.2.57.73> – 0.5

Публікації у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази «Scopus»

5. S. Pozdieiev, V. Nizhnyk, Yu. Feshchuk, V. Nekora, O. Nuianzin, T. Shnal. Investigation of the influence of the configuration of the fire furnace chamber on the

temperature regime during the implementation of tests for fire resistance. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2021, 4(1-112), P. 4–40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239235> - 1

6. Yu. Feshchuk, V. Nizhnyk, V. Nekora, O. Teslenko. Improving The System For Responding To Fire In Areas Contaminated By The Chernobyl Disaster. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences, 2022, 1(451), P. 152–158. <https://doi.org/10.32014/2022.2518-170X.152> – 1.

7. V. Nekora, S. Pozdieiev, O. Nekora, S. Fedchenko, V. Nizhnyk, A. Novhorodchenko, Taras Shnal. Determining the behavior of a glass panel under heating conditions during a fire. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 1 No. 1 (133) (2025): Engineering technological systems. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.320431>

Список публікацій, які засвідчують апробацію дисертації

8. V. Nizhnyk, S. Pozdieiev, V. Nekora, O. Teslenko. Substantiation of the Method for Studying the Behavior of Enclosing Structures with Glazing Under Conditions of Fire Thermal Influence. Lecture Notes in Civil Engineering, 2024, 438, P. 273–285. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_28.

9. Nizhnyk, V., Feshchuk, Y., Nekora, V., Subota, A., Shnal, T. Investigation of the temperature impact of fire through the window opening of a house with a flammable facade on elements of adjacent objects. AIP Conference Proceedings, 2023, 2684, 030031. <https://doi.org/10.1063/5.0120106>.

10. V. Nizhnyk, O. Savchenko, Ya. Ballo, V. Nekora. Theoretical Approaches to Justify the Coefficients of Influence of Fire Protection Systems on Individual Fire Risk. Lecture Notes in Civil Engineering, 2023, 290 LNCE, P. 299–306. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14141-6_30.

11. V. Nekora, S. Sidnei, T. Shnal, O. Nekora, The Improvement of the Method to Determine the Temperature in Steel Reinforced Concrete Slabs in Assessment of their Fire Resistance. Materials Science Forum, 2022, 1066, P. 216–223. <https://doi.org/10.4028/p-3gvljr>.

ДОДАТОК Б**Проект національного стандарту України**



НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

ДСТУ ХХХХ:202Х

Настанова

ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА

**Проектування огорожувальних конструкцій із
склінням**

Вогнестійкість

Основні положення

(проект, перша редакція)

Видання офіційне

Київ

ДП «УкрНДНЦ»

202Х

ДОДАТОК В

Акти впровадження результатів дисертації

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор Національного
університету цивільного захисту України
з навчальної роботиОлександр ДЖУЛАЙ
«__» _____ 2024 року

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
за темою «Удосконалення методу розрахункової оцінки вогнестійкості
огороджувальних конструкцій із скляними елементами» авторки Некори Валерії
Сергіївни

Комісія у складі:

голови – начальника навчально-наукового інституту пожежної безпеки,
кандидата технічних наук, доцента Мельника В.П.та членів – доцента кафедри пожежної профілактики у населених пунктах,
PhD з цивільної безпеки Рашкевич Н.В.;– старшого викладача кафедри пожежної профілактики у населених пунктах
Майбороди Р.І.

склали акт, який підтверджує, що результати дисертаційної роботи «Удосконалення методу розрахункової оцінки вогнестійкості огороджувальних конструкцій із скляними елементами» мають теоретичне та практичне значення для освітнього процесу. Запропоновані методики оцінювання вогнестійкості огороджувальних конструкцій із склінням впроваджені в освітній процес на кафедрі пожежної профілактики у населених пунктах Національного університету цивільного захисту України в навчальній дисципліні «Пожежна безпека будівель та споруд» при підготовці здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальність 261 «Пожежна безпека». Впровадження результатів досліджень даної дисертаційної роботи дозволяє підвищити якість проведення лекційних та практичних занять шляхом розширення знань здобувачів за рахунок практичного застосування нових наукових даних.

Голова комісії:

начальник навчально-наукового інституту
пожежної безпеки,
кандидат технічних наук, доцент

Валентин МЕЛЬНИК

Члени комісії:

доцент кафедри пожежної профілактики
у населених пунктах навчально-наукового інституту
пожежної безпеки,
PhD з цивільної безпеки

Ніна РАШКЕВИЧ

старший викладач кафедри пожежної профілактики
у населених пунктах навчально-наукового інституту
пожежної безпеки

Роман МАЙБОРОДА

ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова комісії з припинення
Інституту державного управління
та наукових досліджень
з цивільного захисту



Андрій КАЛИНОВСЬКИЙ

2025 року

АКТ**впровадження результатів дисертаційної роботи****Некори Валерії Сергіївни на тему:**

«Удосконалення методу розрахункової оцінки вогнестійкості
огороджувальних конструкцій із скляними елементами»

Комісія у складі: голови комісії - начальника науково-дослідного центру протипожежного захисту ІДУ НД ЦЗ докт. техн. наук, професора НІЖНИКА Вадима Васильовича, членів комісії: заступника начальника відділу нормативно-технічного забезпечення науково-дослідного центру протипожежного захисту ІДУ НД ЦЗ докт. техн. наук, ст. досл. БАЛЛО Ярослава В'ячеславовича, начальника відділу досліджень, статистики пожеж та надзвичайних ситуацій науково-дослідного центру протипожежного захисту ІДУ НД ЦЗ канд. техн. наук, ст. досл. КЛИМАСЯ Руслана Володимировича склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи НЕКОРИ Валерії Сергіївни на тему: «Удосконалення методу розрахункової оцінки вогнестійкості огороджувальних конструкцій із скляними елементами» впроваджено у діяльність науково-дослідного центру протипожежного захисту ІДУ НД ЦЗ, шляхом використання запропонованих розрахункових методик оцінювання вогнестійкості скляних елементів огороджувальних конструкцій при проведенні практичного аналізу пожежної безпеки даних конструкцій. Отримані науково-практичні результати було використано при створенні проекту державного стандарту України «Пожежна безпека. Проектування огороджувальних конструкцій із склінням. Вогнестійкість. Основні положення». Даний стандарт має доповнити нормативно правову базу для забезпечення вимог щодо пожежної безпеки будівельних об'єктів, зведених на основі сучасних матеріалів та технологій будівництва.

Акт складено для надання в разову спеціалізовану вчену раду у зв'язку із захистом дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Голова комісії
докт. техн. наук, професор

Вадим НІЖНИК

Члени комісії
докт. техн. наук, ст. досл.

Ярослав БАЛЛО

канд. техн. наук, ст. досл.

Руслан КЛИМАСЬ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
приватного підприємства
«ПроектБудСтар»



Наталія КОНОГРАЙ

2024 року

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи за темою
«Удосконалення методу розрахункової оцінки вогнестійкості огорожувальних
конструкцій із скляними елементами» авторки Некори Валерії Сергіївни

Комісія в складі:

голови — головного інженера проекту приватного підприємства
«ПроектБудСтар» Романа ПУРДЕНКА

та членів — інженера приватного підприємства «ПроектБудСтар»
Владислава КОВАЛЬ, інженера приватного підприємства «ПроектБудСтар»
Катерини СЕКРЕТ склала даний акт про те, що результати дисертаційної роботи
за темою «Удосконалення методу розрахункової оцінки вогнестійкості
огорожувальних конструкцій із скляними елементами» впроваджені в
діяльність приватного підприємства «ПроектБудСтар» шляхом використання
методик оцінювання вогнестійкості огорожувальних конструкцій із скляними
елементами при аналізі пожежної безпеки об'єктів будівництва.

Даний акт не є підставою для одержання премій та інших винагород із
фондів Національного університету цивільного захисту України.

Голова комісії:

головний інженер проекту
приватного підприємства «ПроектБудСтар»

Романа ПУРДЕНКА

Члени комісії:

інженер
приватного підприємства «ПроектБудСтар»

Владислава КОВАЛЬ

інженер
приватного підприємства «ПроектБудСтар»

Катерини СЕКРЕТ