

**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ**

СІДНЕЙ СТАНІСЛАВ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 614.841

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ
ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ
КОНСТРУКЦІЙ ЗА ВТРАТОЮ ЦІЛІСНОСТІ**

21.06.02 – пожежна безпека
21 – національна безпека

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Черкаси – 2025

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Національному університеті цивільного захисту України Державної служби України з надзвичайних ситуацій.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
КОВАЛИШИН Василь Васильович,
Львівський державний університет безпеки
життєдіяльності Державної служби України з
надзвичайних ситуацій, професор кафедри цивільного
захисту;

доктор технічних наук, професор
ДЕМЧИНА Богдан Григорович
Національний університет «Львівська політехніка»
Міністерства освіти і науки України, професор кафедри
будівельних конструкцій та мостів

доктор технічних наук, професор
СУР'ЯНИНОВ Микола Георгійович
Одеська державна академія будівництва та архітектури
Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри
будівельної механіки

Захист відбудеться «15» травня 2025 р. о 14-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.707.04 в Національному університеті цивільного захисту України Державної служби України з надзвичайних ситуацій за адресою: 18034, м. Черкаси, вул. Онопрієнка, 8.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету цивільного захисту України за адресою: вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, а також на сайті спеціалізованої вченої ради Д 64.707.04 за електронною адресою: <https://nuczu.edu.ua/ukr/nauka/spetsializovani-vcheni-rady?view=article&id=366&catid=50>.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.707.04
канд. техн. наук, доцент

Володимир КОЛОСКОВ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним із головних завдань пожежної безпеки у випадку пожежі є створення умов для безпечної евакуації людей та забезпечення ефективної роботи рятувальних підрозділів шляхом обмеження поширення небезпечних чинників пожеж. Для цього необхідно забезпечити належний рівень вогнестійкості конструкцій, зокрема огорожувальних, із урахуванням їхньої здатності зберігати цілісність протягом нормованого часу.

Залізобетонні конструкції традиційно вважаються високовогнестійкими, оскільки бетон повільно прогрівається під впливом пожежі, що забезпечує поступову деградацію його механічних властивостей та арматурної сталі. Ця деградація може призводити до критичних деформацій залізобетонних конструкцій, що веде до досягнення граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати несучої здатності. Окрім цих змін, у бетонних конструкціях утворюються тріщини та дефекти, які створюють шляхи для проникнення небезпечних чинників пожежі.

Слід зазначити, що найбільш вразливими до утворення наскрізних дефектів є статично визначені горизонтальні огорожувальні залізобетонні конструкції, до яких належать порожнисті та ребристі плити. Це зумовлено тим, що небезпечні чинники пожежі, такі як підвищена температура оточуючого середовища, токсичні продукти згоряння і термічного розкладання та дим, зазвичай концентруються у верхній частині приміщення. Крім того, такі конструкції не здатні ефективно перерозподіляти зусилля, що спричиняє утворення критичних напружень у зонах максимальних згинальних моментів, значно прискорюючи втрату їхньої цілісності.

У низці досліджень відсутній детальний аналіз втрати цілісності залізобетонних конструкцій під тепловим впливом пожежі, що пояснюється поширеною гіпотезою, згідно з якою наскрізні тріщини виникають лише після втрати несучої здатності конструкції або безпосередньо перед цим моментом. За таких умов вважається обґрунтованим використовувати як базове припущення, що граничний стан з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності критеріально збігається з моментом настання граничного стану втрати несучої здатності, що зменшує увагу до окремого аналізу цього явища.

Водночас під час вивчення поведінки горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій в умовах вогневих випробувань було встановлено, що утворення та розвиток тріщин у бетоні відбуваються ще до досягнення граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати несучої здатності.

Через це існує ймовірність, що граничний стан з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності у горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкціях може настати раніше, ніж втрата несучої здатності.

Втрата теплоізолювальної здатності в таких конструкціях відбувається значно пізніше, ніж втрата несучої здатності. Це пояснюється низькою теплопровідністю та високою теплоємністю бетону, який є пористим матеріалом, порожнини якого заповнені повітрям – одним із найгірших теплопровідників.

Таким чином, якщо при оцінюванні вогнестійкості горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій не враховувати можливу втрату

цілісності, це може призвести до отримання завищених значень межі (класу) вогнестійкості. В результаті цього, конструкція може бути класифікована як така, що зберігає свою вогнестійкість довше, ніж вона фактично здатна перешкоджати поширенню небезпечних чинників пожежі. У разі пожежі це, у свою чергу, може призвести до передчасного проникнення підвищеної температури оточуючого середовища, токсичних продуктів згоряння, термічного розкладання, полум'я, іскор та диму до суміжних приміщень або на інші рівні будівлі. Така ситуація під час пожежі створює реальну загрозу життю та здоров'ю людей, ускладнюючи евакуацію й рятувальні заходи ще до завершення заявленого часу вогнестійкості конструкції.

Для оцінювання вогнестійкості на даний час застосовується здебільшого два основних підходи – експериментальний та розрахунково-теоретичний. Перший підхід, що базується на проведенні вогневих випробувань, які були покликані відтворювати всі значимі фактори впливу пожежі на елемент будівельної конструкції, включаючи тепловий та силовий впливи, що є результатом певного усереднення. Проте проведення практичних експериментів із визначення межі вогнестійкості залізобетонних плит за досягненням граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності ускладнюється через те, що необігрівна поверхня таких конструкцій покривається вантажами для відтворення умов механічного навантаження. Унаслідок цього фіксація ознак настання цього граничного стану з вогнестійкості в місцях розташування навантаження виявляється неможливою. Інший, розрахунково-теоретичний підхід останнім часом інтенсивно розвивається, що пов'язано з розвитком обчислювальних засобів. Цей метод має всі перспективи повністю витіснити експериментальний підхід, проте, поки що він недостатньо розвинений.

Це зумовлено обмеженістю теоретичних уявлень про механізми і феноменологію деформування бетону під час термосилового впливу у процесі дії пожежі. Така обмеженість особливо проявляється при намаганні спрогнозувати наскрізні дефекти у горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкціях, що пов'язані з фіксацією настання граничного стану за ознакою втрати цілісності, спричиненого тепловим впливом пожежі.

Таким чином, розробка наукових положень ієрархічної системи методів розрахункового оцінювання вогнестійкості горизонтальних огорожувальних конструкцій, зокрема залізобетонних порожнистих та ребристих плит, дає змогу вирішити актуальну науково-технічну проблему, пов'язану з отриманням точних і надійних даних щодо їхньої вогнестійкості у разі настання граничного стану за ознакою втрати цілісності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано відповідно до Державної цільової соціальної програми забезпечення пожежної безпеки на 2011–2015 роки (розпорядження Кабінету Міністрів України від 29.12.2010 р. № 2348-р), згідно з «Угодою про асоціацію між Україною та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами», що ратифікована на підставі Закону України від 16.09.2014 р. № 1678-VII; «Стратегією розвитку системи технічного регулювання на період до 2025 року», затвердженою розпорядженням Кабінету Міністрів України від 22.09.2021 р. № 1145-р., а також у межах науково-дослідних робіт, що виконувались в

Національному університеті цивільного захисту України «Удосконалення експериментально-розрахункового методу оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій за результатами випробувань їх малогабаритних фрагментів» (ДР № 0121U109145) та «Удосконалення розрахункових методів прогнозування цілісності залізобетонних конструкцій під час пожежі» (ДР № 0121U109414), в яких здобувач був виконавцем та відповідальним виконавцем відповідно.

Мета та завдання досліджень. Мета роботи – розробка ієрархічної системи методів оцінювання вогнестійкості горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій за граничним станом за ознакою втрати цілісності на основі математичних моделей та закономірностей утворення тріщин та дефектів в умовах пожежі.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розв’язати такі основні наукові та прикладні завдання.

1. Проаналізувати методи оцінювання вогнестійкості горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій в умовах впливу пожежі за настанням граничного стану за втратою цілісності та шляхи їх удосконалення.

2. Виконати математичне моделювання поведінки фрагменту залізобетонної порожнистої плити для виявлення особливостей механізму руйнування таких будівельних конструкцій в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі за допомогою методу скінчених елементів.

3. Дослідити поведінку залізобетонної порожнистої плити в умовах вогневих випробувань для верифікації розробленої математичної моделі з метою виявлення особливостей механізму руйнування цих плит під час впливу стандартного температурного режиму пожежі.

4. Розробити математичні моделі для проведення досліджень щодо руйнування залізобетонних порожнистих та ребристих плит в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі за допомогою методу скінчених елементів.

5. Розробити спрощені методи оцінювання вогнестійкості горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій за втратою цілісності на основі створення математичних моделей, які визначають критерії настання граничного стану для залізобетонних порожнистих та ребристих плит.

6. Виявити закономірності утворення наскрізних тріщин у горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкціях залежно від конструктивних параметрів та параметрів впливу пожежі на основі проведених досліджень поведінки залізобетонних порожнистих та ребристих плит в умовах впливу пожежі.

7. Розробити ієрархічну систему методів для оцінювання вогнестійкості горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій за граничним станом за ознакою втрати цілісності на основі проведених досліджень поведінки залізобетонних порожнистих та ребристих плит в умовах впливу пожежі.

8. Розробити процедуру реалізації розробленої ієрархічної системи методів для оцінювання вогнестійкості горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій за граничним станом за ознакою втрати цілісності.

Об'єкт дослідження – напружено-деформований стан горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій, що визначає динаміку порушення цілісності в таких конструкціях в умовах пожежі.

Предмет дослідження – процес утворення тріщин та дефектів у горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкціях в умовах пожежі, що призводить до настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності таких конструкцій.

Методи досліджень. Теоретичні дослідження процесу теплопередачі та термосилової реакції в горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкціях, зокрема в порожнистих і ребристих плитах, під впливом пожежі проводилися з використанням рівняння нестационарної теплопровідності, чисельно реалізованого методом скінченних елементів. Також аналізувався напружено-деформований стан елементів будівельних конструкцій під час пожежі, чисельно реалізований методом скінченних елементів та методом деформаційних моделей. Дослідження настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності в горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкціях при пожежі проводилися на основі вогневих випробувань порожнистих плит. Для обробки експериментальних даних та верифікації результатів теоретичних досліджень використовувалися методи математичної статистики. Математичні моделі закономірностей впливу конструктивних параметрів горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій (на основі досліджень поведінки залізобетонних порожнистих і ребристих плит) на час досягнення граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності під дією пожежі були створені за допомогою регресійного аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному.

Вперше отримано наступні наукові результати:

1. Виявлено особливості механізму утворення наскрізних тріщин та дефектів у горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкціях на основі моделювання поведінки порожнистої плити в умовах пожежі, які полягають у виникненні поперечних тріщин внаслідок формування призми руйнування в конструкції з кутом при її вершині $\sim 61^\circ$, що було експериментально підтверджено та стало передумовою для розробки відповідної математичної моделі, яка дозволяє прогнозувати розвиток утворення поперечних тріщин та/або дефектів наскрізного характеру та вказує про настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності для горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій.

2. Розроблено метод оцінювання вогнестійкості для залізобетонних порожнистих плит за настанням граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності, що ґрунтується на застосуванні неявного методу інтегрування рівнянь динаміки та рівнянь напружено-деформованого стану таких конструкцій при їх апроксимації методом скінченних елементів, що сприяє обґрунтованому прогнозуванню межі вогнестійкості таких конструкцій та підвищує рівень пожежної безпеки об'єктів.

3. Розроблено математичну модель утворення поздовжніх тріщин та дефектів у порожнистих залізобетонних плитах, що було експериментально підтверджено, яка

визначає критерій, за яким порівнюється напруження в розтягнутій зоні стінки між порожниною та верхньою поверхнею плити, з межею міцності бетону на розтяг з урахуванням її зниження через нагрівання, що дозволяють прогнозувати розвиток утворення поздовжніх тріщин та/або дефектів наскрізного характеру та вказує про настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності для горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій.

4. Розроблено спрощений метод оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит за втратою цілісності на основі математичних моделей, що визначають критерії, які дозволяють прогнозувати утворення наскрізних поперечних і поздовжніх тріщин та дефектів та вказує про настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності для таких конструкцій в умовах пожежі.

5. Розроблено метод оцінювання вогнестійкості залізобетонних ребристих плит за критерієм втрати цілісності, який базується на математичному моделюванні, що підтверджено експериментальними дослідженнями, та враховує особливості механізму утворення наскрізних тріщин і дефектів, з уточненням геометричної конфігурації руйнування панелі в комірках між ребрами, навіть за умови збереження несучої здатності поздовжніх ребер.

6. Розроблено спрощений метод оцінювання вогнестійкості ребристих залізобетонних плит за ознакою втрати цілісності на основі розробленої математичної моделі для обчислення віртуальних робіт внутрішніх та зовнішніх сил у панелі плити в умовах пожежі, яка включає уточнені данні про геометричну конфігурацію локальної зони руйнування панелі в комірках між ребрами залізобетонних ребристих плит при апроксимації контурів зони руйнування за допомогою ліній Безьє.

7. Отримано на основі проведення повнофакторних експериментів регресійні залежності зміни межі вогнестійкості горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій за настанням граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності від конструктивних параметрів, що дозволило розробити табличний метод для оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності для порожнистих плит залежно від висоти перерізу (H) та осьової відстані від арматури до обігрівної поверхні плити (w) та для ребристих плит залежно від товщини перерізу панелі між ребрами (h_s) та осьової відстані від арматури до обігрівної поверхні панелі між ребрами (w_s).

Удосконалено:

- науково-методичну базу забезпечення вогнестійкості горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій, зокрема порожнистих та ребристих плит за настанням граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності шляхом удосконалення таблиць, які рекомендовані EN 1992-1-2.

Набуло подальшого розвитку:

- застосування номограмних розрахункових методів оцінювання вогнестійкості горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій, зокрема порожнистих та ребристих плит за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності.

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність дисертаційних досліджень полягає у створенні наукових основ для розробки методичної бази розрахункового оцінювання вогнестійкості горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій, зокрема залізобетонних порожнистих та ребристих плит за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності. Це відповідно дає можливість підвищити рівень пожежної безпеки об'єктів шляхом точного визначення відповідності будівельних конструкцій вимогам щодо їхньої вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності.

Розроблена методична база може бути підґрунтям для удосконалення системи норм і стандартів для проектування вогнестійких залізобетонних конструкцій за ієрархічною системою розрахункових методів, запропонованою у цій роботі, яка може бути органічно інтегрована у дані норми.

Розроблені методи апробовані та впроваджені у діяльність ДП «Державний науково-дослідний та проектно-вишукувальний інститут «НДІпроектреконструкція», ДП «Укрдержбудекспертиза» в Одеській області, а також у проектні компанії: ТОВ «Незалежний аудит та інспектування сфери безпеки» та ТОВ «КОМФОРТМЕД ПРОЕКТ», ПП «ПроектБудСтар», та в навчальний процес Національного університету цивільного захисту України.

Обґрунтування та достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується: отриманими результатами при застосуванні неявного та явного методів інтегрування рівнянь статичної рівноваги, складених для деформованого твердого тіла, що дає можливість врахувати нелінійність диференціальних рівнянь теплопровідності та напружено-деформованого стану, пластичне деформування під час розвантаження та повторного навантаження, а також деформування тіла з наявними тріщинами; математичним моделюванням описання процесу деформування бетону з урахуванням утворення тріщин або їх змикання, що визначає критерій міцності матеріалу та дозволяє ідентифікувати моменти появи тріщин у горизонтальних огорожувальних конструкціях; задовільною кореляцією між теоретичними та експериментальними дослідженнями (відносна похибка не перевищує 15 %) підтверджує адекватність розроблених методів оцінювання вогнестійкості, а також апробацією та практичним впровадженням результатів досліджень.

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні наукової проблеми у сфері пожежної безпеки, визначенні мети та завдань, об'єкту та предмету дослідження. Автором особисто проаналізовано наукові роботи та нормативну літературу, які є в основній базі посилань і цитувань з теми роботи, розроблено методичну основу для експериментальних і теоретичних досліджень, опрацьовано та оброблено результати досліджень, а також сформульовано висновки дисертації. Автор особисто організовував та брав участь у підготовці і проведенні всіх експериментальних досліджень. Усі положення, винесені на захист, та результати досліджень наведено в роботах [1–65], з яких роботи [12, 17, 21, 65] опубліковано здобувачем одноосібно.

Особистий внесок здобувача в працях, які написані у співавторстві, полягає у наступному: в роботі [1] розроблено методики проведення обчислювальних експериментів з розподілу температури у двотаврових гофрованих сталевих балках в умовах вогневих випробувань; у роботах [2, 3] створено регресійні залежності для оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит і сходових кліток відповідно до найбільш значущих конструктивно-геометричних параметрів; у роботі [4] встановлено закономірності залежності дисперсії температури в камері згоряння печі від визначених параметрів; у роботі [5] розроблено розрахункову модель для проведення обчислювальних експериментів з оцінювання вогнестійкості залізобетонної ребристої плити, виконано обробку результатів та визначено закономірності зміни межі вогнестійкості залежно від рівня механічного навантаження; в роботі [6] проведено комп'ютерне моделювання поведінки залізобетонної порожнистої плити в умовах пожежі та розроблено метод оцінювання вогнестійкості таких конструкцій за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності; в роботі [7] проведено комп'ютерне моделювання поведінки залізобетонної ребристої плити в умовах пожежі та розроблено метод оцінювання вогнестійкості таких конструкцій за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності; в роботі [8] розроблено ієрархічну систему методів оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності для залізобетонних порожнистих та ребристих плит; у роботі [9] виконано комп'ютерне моделювання з метою визначення впливу конструктивних особливостей вертикальної випробувальної установки на рівномірність розподілу температур у печі за умови впливу стандартного температурного режиму пожежі; в роботі [10] виконано обробку результатів математичного моделювання розвитку та поширення пожежі у приміщеннях натурної моделі триповерхової будівлі та визначено вплив факторів статистичної похибки експерименту; в роботі [11] розроблено математичну модель температурної й механічної реакції впливу пожежі на будівельні конструкції промислових будівель на основі методу скінченних елементів; у роботі [13] розроблено математичні моделі порожнистих залізобетонних плит в умовах пожежі з метою удосконалення зонного методу оцінювання вогнестійкості таких конструкцій; у роботі [14] розроблено теплові математичні моделі для визначення розподілу температури у залізобетонній ребристій плиті за умови впливу стандартного температурного режиму пожежі; в роботі [15] проведено дослідження несучої здатності залізобетонної балки в умовах впливу пожежі із застосуванням спрощеної методики зонного методу; в роботі [16] розроблено обчислювальні моделі для розв'язання теплотехнічної та статичної задач щодо визначення напружено-деформованого стану залізобетонної ребристої плити в умовах пожежі; в роботі [18] проведено теплотехнічні та статичні розрахунки для оцінювання вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити з використанням методу скінченних елементів; у роботі [19] виконано розрахунок напружено-деформованого стану фрагмента залізобетонної порожнистої плити в умовах сумісного термосилового впливу та розроблений метод оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності; в роботі [20] розроблено обчислювальну модель для розв'язання теплотехнічної задачі розподілу температури у фрагменті залізобетонної

ребристої плити; в роботі [22] проведено дослідження факторів, що впливають на поширення пожежі в будівлях; у роботі [23] оброблено результати математичного моделювання впливу різних температурних режимів пожежі та побудовано номограми для визначення межі вогнестійкості сталевих конструкцій за нормативних значень критичної температури; в роботі [24] встановлено та побудовано регресійну залежність максимальної швидкості обвуглювання та максимального часу процесу обвуглювання дерев'яних конструкцій від найбільш значущих параметрів приміщень, де виникає пожежа; в роботі [25] оброблено результати розподілу температури сталевих колон з вогнезахистом в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі; в роботі [26] розроблено обчислювальні моделі та проведено розрахунок оцінювання вогнестійкості горизонтальних та вертикальних сталевих конструкцій за втратою несучої здатності; в роботі [27] встановлено залежності вогнестійкості сталезалізобетонних плит від конструктивних параметрів; у роботі [28] розроблено обчислювальну модель напружено-деформованого стану порожнистої плити в умовах пожежі, а також методику розрахунку її руйнування в цих умовах; у роботі [29] розроблено математичні моделі та проведено обчислювальні експерименти щодо визначення вогнестійкості несучих стін; у роботах [30, 31] проведено обчислювальні експерименти дослідження рівномірності прогрівання несучої залізобетонної стіни під час її випробувань на вогнестійкість; у роботах [32, 33] розроблено математичні моделі для визначення конфігурації вертикальної випробувальної печі з найбільш рівномірним розподілом температур; у роботі [34] виконано моделювання процесів нестационарного теплообміну під час випробувань залізобетонних конструкцій на вогнестійкість; у роботах [35, 36] проведено дослідження впливу конструктивних параметрів камер вогневих печей на адекватність результатів випробувань стін на вогнестійкість; у роботі [37] проведено дослідження щодо настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності електричної шафи запорізької атомної електричної станції в умовах пожежі; в роботі [38] проведено дослідження щодо перевірки впливу вимірювальних приладів на адекватність результатів випробувань на вогнестійкість вертикальних конструкцій; у роботі [39] взято участь у розробленні математичної моделі прогнозування прогресуючого руйнування в будівлях із залізобетонними конструкціями; в роботі [40] взято участь у розробленні методики дослідження впливу конструктивних параметрів гнучких елементів огорожі в умовах вибуху; в роботі [41] взято участь у розробленні математичної моделі прогресуючого руйнування для каркасів будівель; у роботі [42] проведено дослідження щодо виявлення впливу залежності між значенням межі вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій і дисперсією температур на їхніх обігрівальних поверхнях; у роботі [43] визначено вплив вимірювальних приладів на достовірність результатів випробувань на вогнестійкість вертикальних конструкцій; у роботі [44] взято участь у розробці скінченно-елементної моделі для проведення досліджень впливу пожежі на сталеві конструкції; в роботі [45] взято участь у розробленні методики експериментальних досліджень поведінки дерев'яної балки із вогнезахистом в умовах впливу пожежі; в роботі [46] розроблено обчислювальну модель для проведення досліджень впливу на показники значення межі вогнестійкості

будівельних конструкцій від дисперсії температур; у роботі [47] розроблено обчислювальну модель для проведення досліджень розподілу температури в залізобетонній плиті перекриттів за допомогою методу скінченних елементів; у роботі [48] проведено оцінювання вогнестійкості залізобетонних плит в умовах пожежі; в роботі [49] взято участь у розробленні методики проведення повнофакторного експерименту щодо вивчення впливу пожежі в кабельних тунелях; у роботі [50] взято участь у розробленні обчислювальних моделей розподілу температури по сталезалізобетонній плиті в умовах пожежі; в роботі [51] взято участь у розробці методики проведення експериментальних досліджень оцінювання межі вогнестійкості залізобетонного сходового маршу; в роботі [52] розроблено спрощений розрахунковий метод оцінювання вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити; в роботі [53] розроблено скінченно-елементну модель для дослідження розподілу температури у сталевій балці; в роботі [54] проведено дослідження розподілу температури в залізобетонній колоні в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі; в роботі [55] проведено обчислювальні експерименти з оцінювання вогнестійкості залізобетонної ребристої плити за допомогою методу скінченних елементів; у роботі [56] розроблено обчислювальну модель та проведено розрахунок розподілу температури в залізобетонній ребристій плиті в умовах пожежі; в роботі [57] розроблено скінченно-елементну модель для оцінювання вогнестійкості залізобетонних плит в умовах впливу параметричних температурних режимів пожежі; в роботі [58] розроблено математичну модель на основі методу скінченних елементів для оцінювання вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити; в роботі [59] проведено дослідження механізму руйнування залізобетонної порожнистої плити в умовах пожежі; в роботі [60] проведено дослідження напружено-деформованого стану залізобетонної ребристої плити під час оцінювання вогнестійкості за втратою несучої здатності; в роботах [61, 62] розроблено математичну модель на основі методу скінченних елементів та проведено розрахунок оцінювання вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити; в роботах [63, 64] розроблено математичну модель на основі методу скінченних елементів та проведено оцінювання вогнестійкості залізобетонної ребристої плити.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційного дослідження доповідались, обговорювались та отримали позитивне схвалення на: Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія, практика, інновації» (м. Львів, 2016); Всеукраїнській науково-практичній конференції рятувальників (м. Київ, 2017); VII Міжнародній науково-практичній конференції (м. Чернігів, 2017); XVIII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering, production engineering and physics» (Czestochowa, 2017); VI Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (м. Харків, 2017); VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2017); 6th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings» (м. Харків, 2017); Всеукраїнській науково-практичній

конференції курсантів і студентів «Пожежна та техногенна безпека: наука і практика» (м. Черкаси, 2018); XIII Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності» (м. Львів, 2018); 7th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings» (м. Харків, 2018); IOP Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings» (м. Харків, 2019); XI Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2020); X Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2020, 2021, 2023, 2024); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій» (м. Харків, 2020, 2022, 2023); International Scientific Conference «Energy Efficiency in Transport» (Kharkiv, 2021); XII Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2021); Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення» (м. Львів, 2022); IX Міжнародній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (м. Одеса, 2022); Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту» (м. Харків, 2023); XIII Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю (м. Черкаси, 2023); 9th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings» (м. Харків, 2021); XIX Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності» (м. Львів, 2024); X Міжнародній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (м. Одеса, 2024); XV Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2024); XIII науковій конференції «Наукові підсумки» (м. Харків, 2024).

Публікації. Основні положення та наукові результати дисертації опубліковано в 65 наукових працях, серед яких: 2 монографії, 27 статей у наукових виданнях, з них 7 статей у виданнях, включених до міжнародної наукометричної бази Scopus, 13 статей у наукових фахових виданнях України, 7 статей, які додатково висвітлюють наукові результати дисертації, 36 тез доповідей у збірниках матеріалів міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, змісту, вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 303 найменувань та 7 додатків. Загальний обсяг роботи складає 361 сторінку друкованого тексту, з них обсяг основного тексту – 272 сторінки, 128 рисунків, 43 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, завдання, об'єкт та предмет дослідження, відображено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Описано структуру та короткий зміст дисертації. Наведено відомості щодо апробації та опублікування основних результатів досліджень.

У **першому розділі «Аналіз проблематики розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних конструкцій»** проаналізовано сучасні нормативні вимоги щодо вогнестійкості залізобетонних конструкцій, що дало змогу визначити загальну концепцію та критерії оцінювання даного параметра. Окреслено критерії оцінювання вогнестійкості, зокрема за настанням граничних станів втрати несучої здатності, теплоізолювальної здатності та цілісності, а також розглянуто особливості впливу температури на залізобетонні конструкції. Проаналізовано формалізацію теплового впливу пожежі, що дозволяє визначити реальні умови експлуатації конструкцій під час пожежі.

Науковим підходам, що передбачають розвиток розрахункових методів оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності огорожувальних залізобетонних будівельних конструкцій присвячені роботи Жукова В. В., Ройтмана В. М., Шапіро Г. І., Поздєєва С. В., Шмуклера В. С., Ватулі Г. Л., Демчини Б. Г., Шналя Т. М., Семерака М. М., Zhao B., Buchanan A., Bisby L., Fellinger J., Jansson R., Lim L., Burgess I., Abrams M., Ahmed G., Pettersson O., Magnusson S., Phan L. та ін.

Проведений аналіз літературних даних щодо досліджуваних напрямків дозволив встановити наступне:

- існують технічні складнощі у фіксації критеріїв настання граничного стану вогнестійкості за ознакою втрати цілісності під час проведення експериментальних досліджень;

- незважаючи на інтенсивний розвиток розрахунково-теоретичного підходу в останні роки, він залишається недостатньо опрацьованим. Це зумовлено обмеженістю теоретичних уявлень про механізми та феноменологію деформування бетону в умовах термосилового впливу під час пожежі. Така невизначеність особливо проявляється при намаганні спрогнозувати утворення наскрізних дефектів у горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкціях, що ускладнює визначення моменту настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності внаслідок впливу пожежі;

- перспективним напрямом є використання розрахунково-теоретичного підходу, заснованого на наукоємних математичних моделях, що описують феноменологію поведінки залізобетону під час пожежі. Такий підхід дозволяє визначати місця утворення тріщин і локальних руйнувань бетону, проте існують певні недоліки, що ставить під сумнів повсюдне застосування розрахунково-теоретичного підходу у такій модифікації:

- а) висока трудомісткість створення розрахункових моделей;
- б) недостатня теоретична опрацьованість методик їхнього застосування;

в) необхідність експериментальної верифікації отриманих результатів;

г) висока вартість програмного забезпечення та проведення обчислень;

– на даний час чинні нормативні документи розвинених країн не містять рекомендацій щодо застосування розрахункових методів для оцінювання вогнестійкості горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій за ознакою втрати цілісності. Тобто відсутні апробовані розрахункові методи, які б мали практичну реалізацію, розвинену критеріальну базу та підтверджені експериментальні результати.

За результатами проведеного аналізу проблематики розрахункового оцінювання вогнестійкості горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій за ознакою втрати цілісності сформульовано мету, визначено завдання та методи дослідження.

У другому розділі «Математичне моделювання поведінки горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій в умовах впливу пожежі» виконано математичне моделювання поведінки фрагменту залізобетонної порожнистої плити для виявлення особливостей механізму руйнування таких будівельних конструкцій в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі. Розрахунки проведено методом скінченних елементів із використанням явного підходу до інтегрування рівнянь механіки деформованого тіла.

Для моделювання напружено-деформованого стану у залізобетонних плитах, було використано узагальнений теоретично-розрахунковий інженерний підхід, який ґрунтується на таких основних посиланнях:

1. Для математичного моделювання напружено-деформованого стану деформованого твердого тіла застосовується узагальнений теоретичний підхід, який ґрунтується на ініціації переміщень точок механічної системи твердих деформованих тіл із застосуванням системи загальних рівнянь динаміки та рівнянь напружено-деформованого стану, що викликається даними переміщеннями. Дані рівняння інтегруються за допомогою метода скінченних елементів.

2. Для моделювання бетонної основи залізобетонних плит застосовуються тривимірні масивні скінченні елементи гексаедричної форми із вісьма вузлами.

3. Для моделювання сталеві арматури у вигляді арматурних стержнів використовується одновимірні лінійні елементи із визначеною формою перерізу.

4. Для моделювання нелінійної поведінки бетону під дією навантажень використовується пластична модель ушкодженого бетону, запропонована у наукових роботах Grassl та Jirasek. Вона базується на нелінійних діаграмах деформування із спадними гілками та враховує як крихке, так і в'язке руйнування бетону шляхом завдання ефективного пластичного напруження на основі співвідношень пластичної та пружної деформацій.

5. Як модель матеріалу сталеві арматури використовується матеріал із можливістю пластичних деформацій, що описується білінійними діаграмами деформування типу Прандтля. Ці діаграми містять лише ділянку зростання та горизонтальну ділянку з граничною деформацією 15 %, враховуючи температурне розширення та зниження механічних характеристик арматури під час високотемпературного нагріву.

6. Для відтворення взаємодії між поверхнями спирання залізобетонних плит та їх опорними кінцями використовується модель контактної взаємодії. Поверхні спирання за прийнятими припущеннями складаються з абсолютно недеформованого матеріалу. Прикладання навантаження має динамічний характер і відбувається поступово протягом визначеного часу.

7. Механічні та температурні навантаження на плиту прикладаються послідовно, відтворюючи їхню реальну черговість. Температурні навантаження застосовуються пропорційно до часу після прикладання власної ваги, попереднього напруження та діючого навантаження.

8. Значення температур для формування температурного навантаження є результатом розв'язання теплотехнічної задачі, заснованої на інтегруванні нестационарного рівняння теплопровідності у вигляді:

$$c_p(\theta)\rho(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial t} = \nabla(\lambda(\theta)\nabla\theta), \quad (1)$$

де $\rho(\theta)$, $\lambda(\theta)$, $c_p(\theta)$ – залежні від температури нагріву густина бетону, коефіцієнт теплопровідності бетону та питома теплоємність бетону відповідно.

9. Параметри, отримані у ході розрахунку однозначно показують положення та геометричну конфігурацію кожної основної окремої тріщини.

Межа вогнестійкості залізобетонної плити за настанням граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати несучої здатності відбувається на 52,4 хв впливу стандартного температурного режиму пожежі.

На рис. 1 наведений розподіл еквівалентних пластичних деформацій усередині фрагменту залізобетонної порожнистої плити.

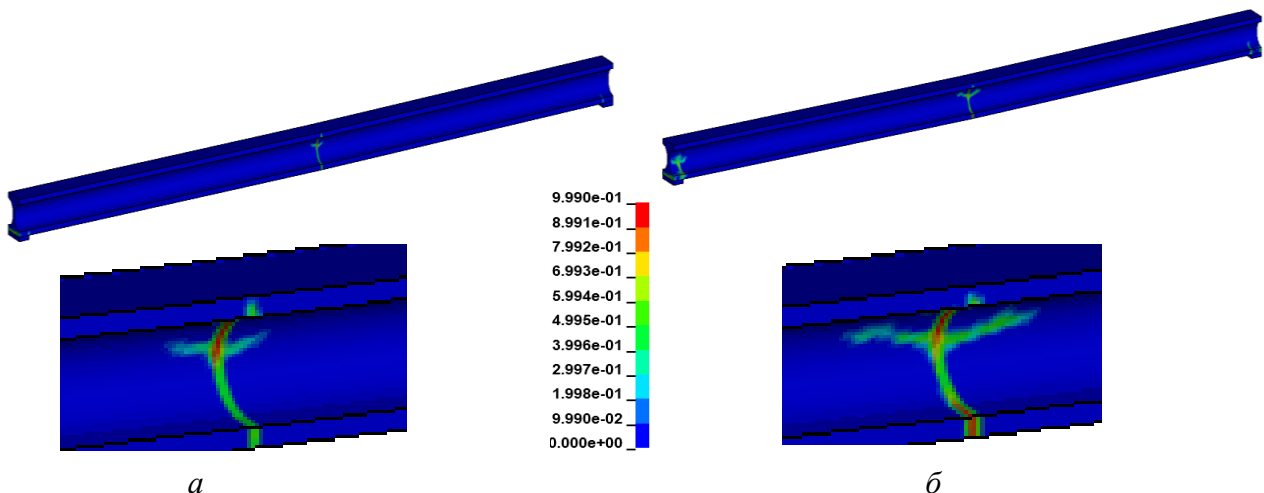


Рис. 1. Розподіл ефективних пластичних деформацій у фрагменті залізобетонної плити у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі: *a* – на 45 хв; *б* – на 52,4 хв

Пластичні деформації локалізуються усередині та по краях фрагменту із характерною Y-подібною формою всередині плити. Це свідчить про те, що зразок руйнується через зсувні деформації із характерною ділянкою, що називається призмою руйнування.

Отриманий результат є важливим для розуміння механізму утворення наскрізних тріщин у залізобетонних порожнистих плитах під впливом високотемпературного нагрівання під час пожежі. Варто зазначити, що поява наскрізної тріщини відбувається за 7,4 хвилини до настання граничного стану вогнестійкості за критерієм втрати несучої здатності.

За результатами проведених розрахунків вперше виявлено особливості механізму утворення наскрізних тріщин та дефектів у порожнистих плитах, які полягають у виникненні поперечних тріщин внаслідок формування призми руйнування в конструкції з кутом при її вершині $\sim 61^\circ$, що було експериментально підтверджено (у третьому розділі роботи) та вказує на настання граничного стану втрати цілісності для таких конструкцій. Утворення цієї призми руйнування зафіксовано на 45-й хвилині впливу пожежі та пов'язано з утворенням косих поперечних тріщин, що може свідчити про настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності. Це передуює настанню критичного прогину залізобетонної порожнистої плити (230,114 мм), а саме настанню граничного стану вогнестійкості за втратою несучої здатності за 7,4 хвилин під час проведення математичного моделювання.

У третьому розділі «Результати експериментального дослідження поведінки горизонтальних огорожувальних конструкцій в умовах вогневих випробувань» проведені дослідження поведінки залізобетонної порожнистої плити в умовах вогневих випробувань для верифікації розробленої математичної моделі, реалізованої за допомогою методу скінченних елементів (у другому розділі). Для цього було розроблено відповідну методику проведення експериментальних досліджень поведінки залізобетонної порожнистої плити в умовах вогневих випробувань. Методика включає аналіз температурних показників, параметрів напружено-деформованого стану, а також дослідження передумов утворення та розвитку наскрізних тріщин, що можуть бути пов'язані з настанням граничного стану з втрати цілісності в умовах впливу пожежі. За результатами досліджень під час вогневих випробувань встановлено, що граничний стан з вогнестійкості за ознакою втрати несучої здатності настає на 50-й хвилині через досягнення критичного прогину (230,114 мм) порожнистої плити, що також підтверджується швидкістю зростання найбільшого прогину зразків залізобетонних плит, які були протестовані в умовах вогневих випробувань (рис.2).

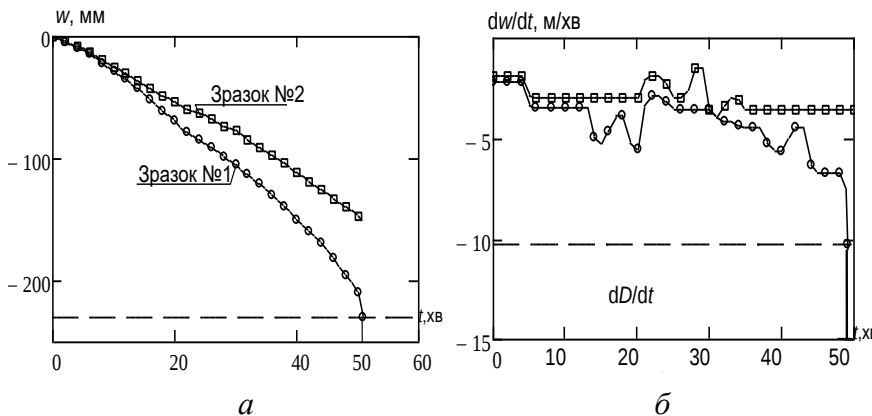


Рис. 2. Криві фіксації настання граничного стану втрати несучої здатності зразків залізобетонних порожнистих плит, підданих вогневим випробуванням: *а* – залежність від часу найбільшого прогину зразків залізобетонних плит; *б* – залежність від часу швидкості зростання найбільшого прогину плит

Криві, представлені на рис. 2 для фіксації настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати несучої здатності доповнені горизонтальною лінією, що виражає критичне значення максимального прогину.

Також встановлено, що утворення наскрізних тріщин відбувається в середній частині прольоту конструкції за механізмом утворення призми руйнування з кутом при вершині $\sim 61^\circ$. Цей висновок узгоджується з результатами, отриманими у другому розділі роботи за допомогою математичного моделювання (рис. 1, 3).



Рис. 3. Форма та характер розподілу тріщин у бетоні зразків залізобетонних плит, підданих вогневим випробуванням у момент перед руйнуванням одного із зразків: *a* – зразок № 1; *б* – зразок №2

Процес руйнування конструкції, що досліджується супроводжується активним зростанням висоти поперечних тріщин, починаючи з 35-ї хвилини, тобто за 15 хвилин до втрати несучої здатності, що можна спостерігати на графіку представленого на рис. 4.

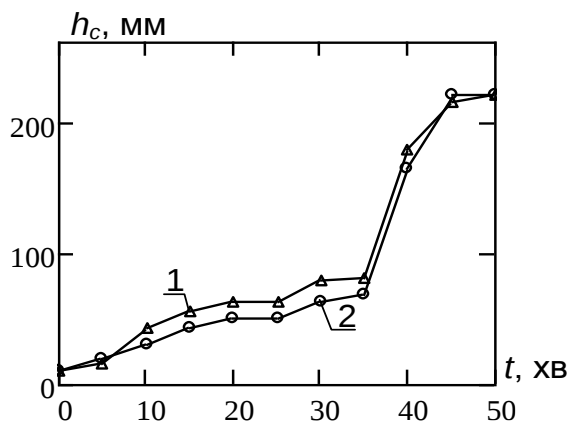


Рис. 4. Криві залежностей середньої висоти нормальних тріщин від часу вогневих випробувань зразків залізобетонних порожнистих плит: 1 – зразок № 1; 2 – зразок №2

Крім того, виявлено механізм утворення поздовжніх наскрізних тріщин, які виникають унаслідок температурного розширення бетону та арматури в нижніх шарах залізобетонної порожнистої плити. Їхнє утворення зафіксовано на 46-й хвилині, що можна пов'язати з настанням граничного стану втрати цілісності.

На рис. 5 представлені фотографії тріщин у зразках залізобетонних порожнистих плит, зроблені на фінальній стадії випробувань перед настанням граничного стану втрати несучої здатності. Аналіз експериментальних даних підтвердив адекватність математичного моделювання поведінки залізобетонної порожнистої плити.

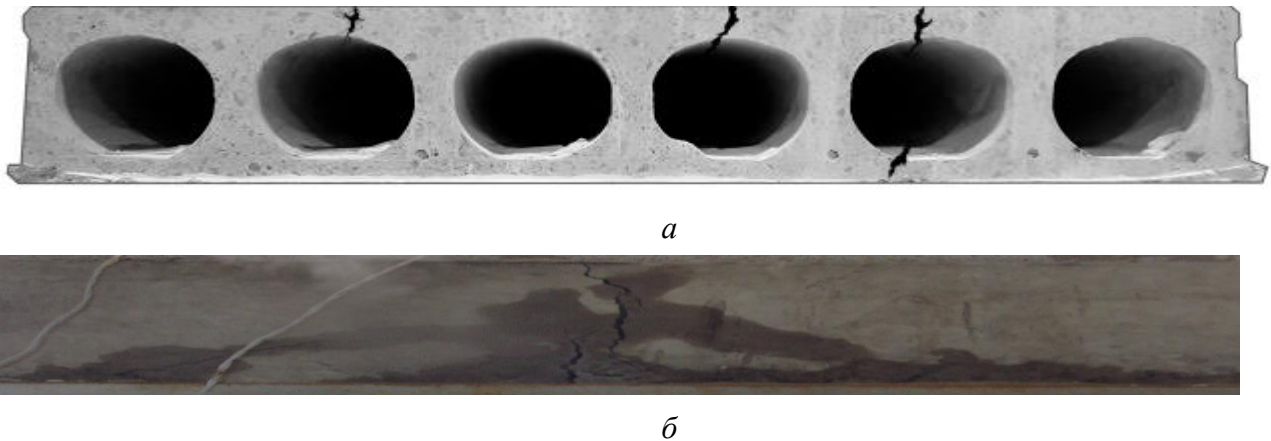


Рис. 5. Зовнішній вигляд тріщин, що з'явилися у досліджуваних зразках залізобетонних порожнистих плит в умовах вогневих випробувань: *а* – поздовжні тріщини, що утворились внаслідок температурного розширення нижніх шарів бетону плити, *б* – поперечні тріщини, що утворились внаслідок утворення призми руйнування

Відносна похибка не перевищує 15 %, а критерій Фішера не перевищує табличного значення при рівні значущості 0,05.

У четвертому розділі «Розрахункове оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит за настанням граничного стану втрати цілісності» для розробки математичної моделі, що описує напружено-деформований стан залізобетонних порожнистих плит застосовано універсальний розрахунково-теоретичний підхід. На відміну від підходу, використаного в другому розділі, він базується на неявному методі до інтегрування рівнянь механіки деформованого тіла та ґрунтується на таких основних положеннях.

1. Як базову математичну модель, що описує напружено-деформований стан залізобетонних порожнистих плит під час пожежі, застосовується загальна система диференціальних рівнянь механіки твердого тіла, яка інтегрується із застосуванням методу скінченних елементів.

2. Процес поширення тепла у внутрішніх шарах залізобетонних порожнистих плит відбувається виключно в їхній бетонній основі з огляду на значну різницю теплопровідності бетону та арматурної сталі.

3. Механічні характеристики бетону та арматурної сталі нелінійно залежать від деформації скінченного елемента, що визначається зміщеннями вузлів. Водночас слід враховувати великі деформації залізобетонних порожнистих плит, порівнянні з їхніми габаритними розмірами.

4. Базова система диференціальних рівнянь, що описує напружено-деформований стан, інтегрується числовим методом скінченних елементів із залученням ітеративного методу Ньютона–Рафсона. Лінеаризації диференціальних рівнянь, здійснюється шляхом покрокового прикладання наявного механічного навантаження до фіксування ознак руйнування досліджуваних залізобетонних порожнистих плит.

5. Для обчислення параметрів напружено-деформованого стану у залізобетонних порожнистих плитах під час теплового впливу пожежі враховується

феноменологія поведінки бетону та арматурної сталі в процесі нагрівання при використанні повних несиметричних діаграм деформування із спадаючою гілкою.

6. Феноменологія поведінки бетону та арматурної сталі також враховується при відповідній модифікації матриць, що описують поведінку матеріалів із врахуванням появи пластичних деформацій та тріщин у вузлах скінченних елементів.

7. Ознаками повного руйнування досліджуваних залізобетонних порожнистих плит є:

- поява розбіжності ітеративного процесу обчислення через втрату геометричної незмінності системи;
- досягнення граничних величин пластичних деформацій у вузлах скінченних елементів моделі залізобетонних порожнистих плит;
- фіксація критичних значень швидкості нарощення глобальних переміщень точок скінченних елементів моделі залізобетонних порожнистих плит.

Статичні задачі моделювання напружено-деформованого стану залізобетонних плит при односторонньому впливі пожежі зі стандартним температурним режимом вирішувалися поетапно, з поступовим відтворенням навантаження у дві стадії. На першій стадії моделювалося прикладання діючого навантаження. На другій стадії здійснювалося навантаження шляхом розподілу температури до вузлів скінченних елементів.

За результатами аналізу адекватності отриманих даних шляхом їх порівняння з експериментальними значеннями (рис. 6) побудовано графік прогину, отриманий як у результаті розрахунку, так і під час експерименту. Встановлено, що наведені графіки мають високу збіжність, а похибка розрахункових результатів відносно експериментальних даних не перевищує 4 %. При цьому розбіжності у значеннях настання максимального прогину фрагмента порожнистої плити між явним та неявним методами інтегрування, не зафіксовано. Це свідчить про достатню адекватність отриманих результатів в цьому розділі, що дозволяє використовувати їх для подальшого аналізу.

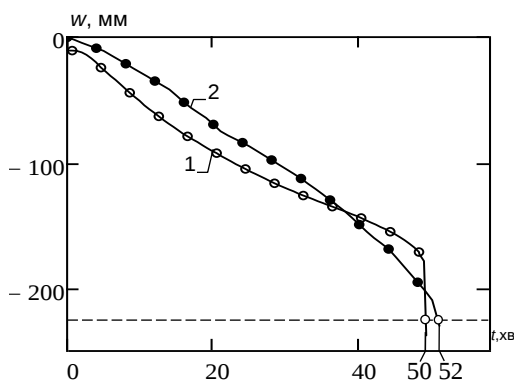


Рис. 6. Графіки максимального прогину залізобетонної плити під впливом стандартного температурного режиму пожежі: 1 – отриманий експериментально; 2 – отриманий у результаті розрахунку

Узагальнюючи розподіл ушкоджень, приймається, що скінченний елемент бетону, який зазнав повного руйнування, виключається із загального ансамблю скінченних елементів під час моделювання опору конструкції навантаженню. Відтак, видалення таких скінченних елементів можна розглядати як додатковий критерій ідентифікації настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності за утворенням наскрізних тріщин.

На рис. 7 показані положення вилучених зруйнованих скінченних елементів з розрахункової схеми залізобетонної порожнистої плити.

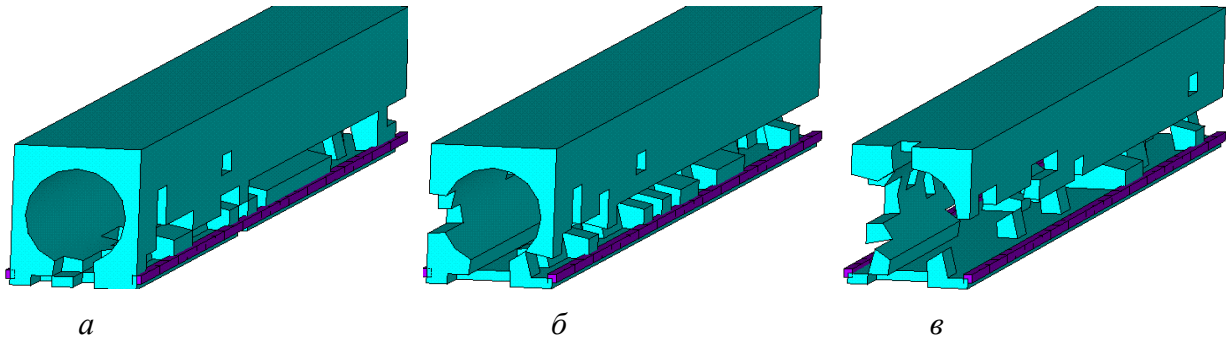


Рис. 7. Положення вилучених зруйнованих скінченних елементів з розрахункової схеми залізобетонної порожнистої плити у різні моменти часу впливу пожежі: а – 15 хв; б – 30 хв; в – 44 хв

Таким чином, можна зробити висновок, що описаний підхід до розрахунку є ефективним щодо оцінювання межі вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності. Було визначено, що цей граничний стан відбувається на 44 хв (рис. 7в) впливу стандартного температурного режиму пожежі. Це співпадає із експериментальними даними (рис. 5а).

Використовуючи підхід, який був описаний у 2-му розділі роботи, слід зазначити, що механізм утворення наскрізної тріщини у верхньому шарі залізобетонних порожнистих плит може бути пов'язаний із утворенням призми руйнування.

За результатами проведених досліджень у цьому розділі вперше створено математичні моделі, що виражають критерії утворення поперечної та поздовжньої тріщин. Початок утворення поперечної наскрізної тріщини визначається за формулою:

$$h_p = \sqrt{\frac{3 \sin^2 \phi_c}{f_{ct,\theta} b_s} \left(\frac{q_E l^2}{8} - f_{s,\theta} \frac{\pi \cdot d_s^2}{4} \right)} \leq w_c, \quad (2)$$

де h_p – глибина поперечної тріщини, $\sin \phi$ – кут призми руйнування при її вершині $\sim 61^\circ$, q – рівномірне розподілене навантаження на плиту, $f_{ct,\theta}$ – знижена міцність бетону на стиск із урахуванням впливу температури від пожежі, $f_{s,\theta}$ – знижена міцність арматури на розтяг із урахуванням впливу температури від пожежі, b_s – ширина перерізу конструкції, d_s – діаметр арматури, w_c – відстань від верхньої поверхні плити до краю порожнини.

Таким чином, використовуючи дану формулу можна оцінити небезпеку утворення наскрізної тріщини. Критерієм небезпечного утворення наскрізної тріщини є перевищення відстані h_p від верхньої поверхні плити до краю порожнини w_c .

Також вперше розроблено математичну модель, що визначає критерій утворення поздовжньої тріщини у залізобетонній порожнистій плиті, яка виникає внаслідок температурного розширення нижніх шарів плити. За допомогою цієї моделі визначають напруження в розтягнутій зоні стінки між порожниною та поверхнею плити у верхній її частині. Отримане значення напруження порівнюється з межею

міцності бетону на розтяг з урахуванням її зниження через нагрівання. Якщо обчислене напруження перевищує межу міцності бетону на розтяг, фіксується утворення магістральної поздовжньої тріщини та настання граничного стану втрати цілісності. Умова виникнення поздовжньої тріщини виглядає:

$$\sigma_{c,\theta} > f_{ct,\theta}, \quad (3)$$

де $\sigma_{c,\theta}$ – обчислене напруження в розтягнутій зоні стінки між порожниною та поверхнею плити у верхній її частині; $f_{ct,\theta}$ – межа міцності бетону на розтяг з урахуванням її зниження через нагрівання.

Таким чином, за результатами проведених досліджень вперше було розроблено уточнений метод оцінювання вогнестійкості горизонтальних залізобетонних конструкцій за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності. Метод базується на неявному підході до інтегрування рівнянь динаміки та напружено-деформованого стану, застосованому до конструкцій, апроксимованих методом скінченних елементів.

Крім того, вперше розроблено математичні моделі, що визначають критерії утворення поперечних і поздовжніх тріщин у залізобетонних порожнистих плитах під впливом пожежі. Це дозволило вперше розробити спрощений метод оцінювання вогнестійкості таких конструкцій за граничним станом втрати цілісності. Запропоновані методи мають ієрархічну структуру: в її основі знаходяться спрощені методи, тоді як на вершині – уточнені методи, побудовані на основі методу скінченних елементів.

У п'ятому розділі «Розрахункове оцінювання вогнестійкості залізобетонних ребристих плит за настанням граничного стану втрати цілісності» проведене математичне моделювання поведінки залізобетонних ребристих плит в умовах впливу пожежі.

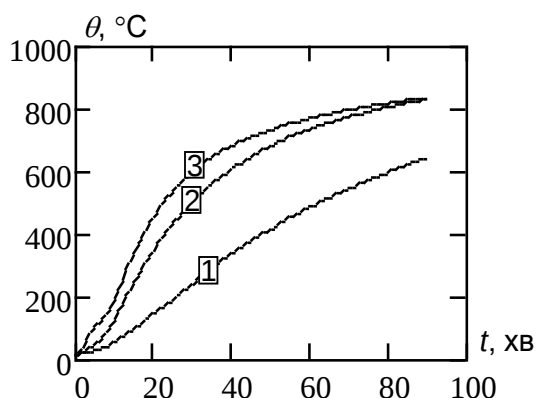


Рис. 8. Температурні криві нагріву арматурних стержнів залізобетонної ребристої плити залежно від часу: 1 – у поздовжньому ребрі; 2 – у поперечному ребрі; 3 – у панелі між ребрами

На рис. 8 наведено побудовані криві нагріву арматури у залізобетонній ребристій плиті. На кривих рис. 8 можна побачити, що найбільше прогрівається арматура в панелі між ребрами, оскільки вона має найменший захисний шар. Трохи повільніше підвищується температура у поперечних ребрах, а найповільніше прогрівається арматура у поздовжніх ребрах, оскільки має найбільший захисний шар. Такий стан дає змогу припустити, що найшвидше може зруйнуватися панель між ребрами. Формально можна встановити, що її руйнування більше стосується втрати цілісності, ніж втрати несучої здатності, яка пов'язана з несучою здатністю поздовжніх ребер. Отримані результати розв'язання теплотехнічної задачі, описані вище, було використано для проведення розрахунку

параметрів напружено-деформованого стану залізобетонної ребристої плити за прийнятим підходом.

За результатами обчислень був одержаний набір даних про напружено-деформований стан, що має бути проаналізований для виявлення аспектів і закономірностей настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності залізобетонної ребристої плити в умовах впливу пожежі.

Отримано цікаву картину нарощування вертикальних переміщень плити, наведену на рис. 9. При дії прикладеного силового навантаження (у даному випадку 30 % від руйнуючого навантаження, а саме $q_E = 1.8 \text{ кН/м}$) плита має найбільші вертикальні переміщення посередині прольоту плити, а зона найбільших вертикальних переміщень має круглу форму.

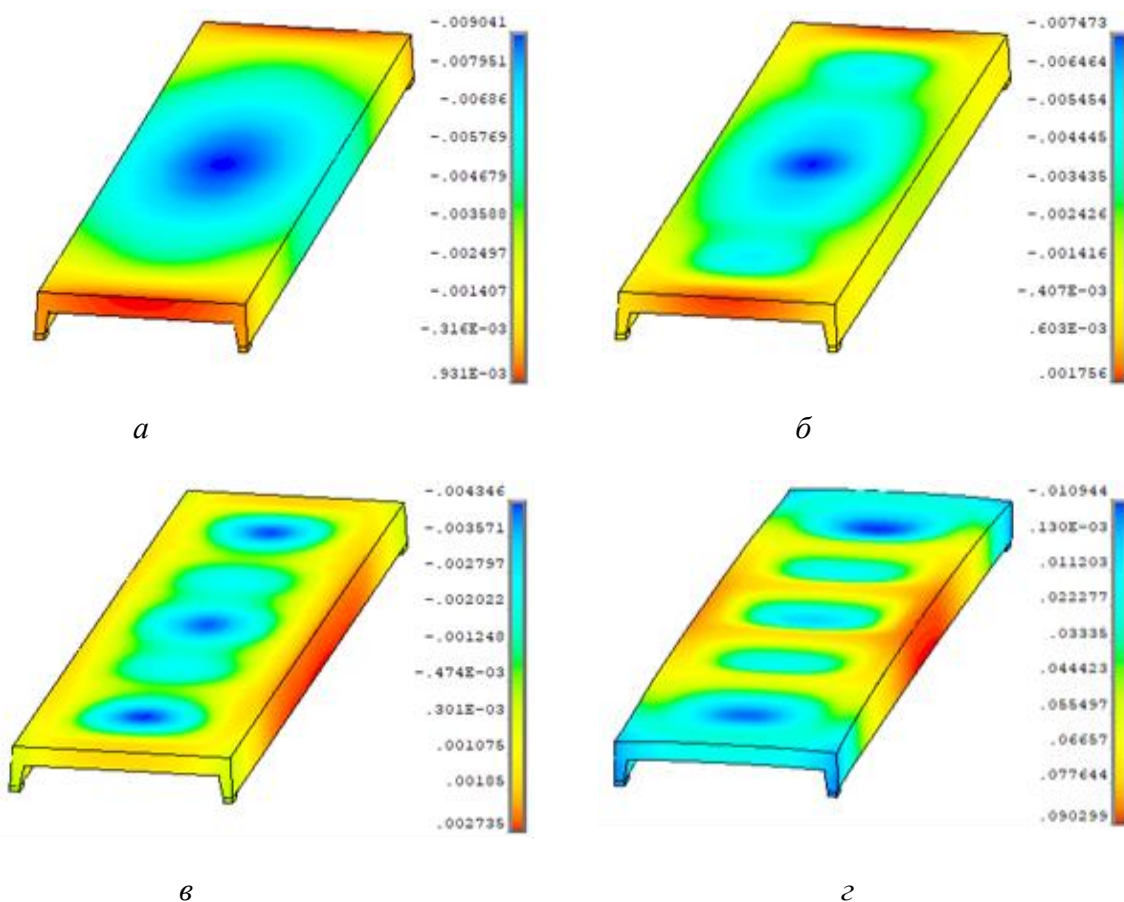


Рис. 9. Розподіл вертикальних переміщень (м) у залізобетонній ребристій плиті, що досліджується в різні моменти часу під впливом стандартного температурного режиму пожежі: а – 1 хв; б – 3 хв; в – 5 хв; г – 25 хв

Під час моделювання теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі спочатку зона найбільших переміщень має форму еліпса, витягнутого вздовж поздовжньої осі плити. На етапах тривалішого теплового впливу найбільші переміщення концентруються в комірках плити, утворених поздовжніми та поперечними ребрами. На рис. 9 видно, що під впливом високих температур під час пожежі ребриста плита поступово вигинається вгору. Це явище може бути

спричинене температурним розширенням панелі між ребрами. Аналіз розподілу деформацій свідчить про те, що втрата цілісності конструкції, ймовірно, відбувається внаслідок руйнування панелі в комірках між поздовжніми та поперечними ребрами плити. Також одним із обчислених параметрів, важливих для оцінювання можливості утворення наскрізних дефектів у ребристих плитах, за якими можна зафіксувати настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності, є напруження, за яких виникають пластичні деформації у бетоні.

На рис. 10 показані побудовані розподілення значень напружень при яких виникають пластичні деформації в різні моменти часу.

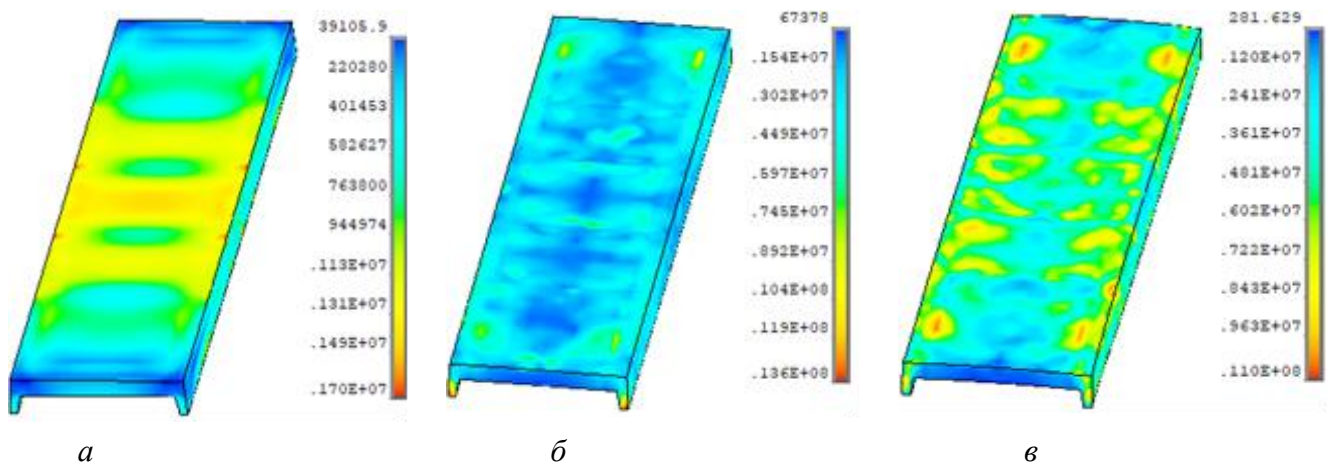


Рис. 10. Розподіли величини напружень (Па) при виникненні еквівалентної пластичної деформації по простору бетонної основи залізобетонної ребристої плити у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі: *а* – 0 хв; *б* – 10 хв; *в* – 25 хв

Аналізуючи розподіл пластичних напружень, можна побачити, що гіпотеза про руйнування шару бетону в комірках, утворених між поздовжніми та поперечними ребрами залізобетонної ребристої плити, підтверджується, оскільки найбільша концентрація напружень спостерігається біля ребер.

Ще одним важливим параметром, що дає змогу зафіксувати настання граничного стану втрати цілісності є розподіл «тріщин», настання яких ідентифікується у точках інтегрування при застосуванні теорії міцності. На рис. 11 показані отримані розподіли тріщин у різні моменти часу.

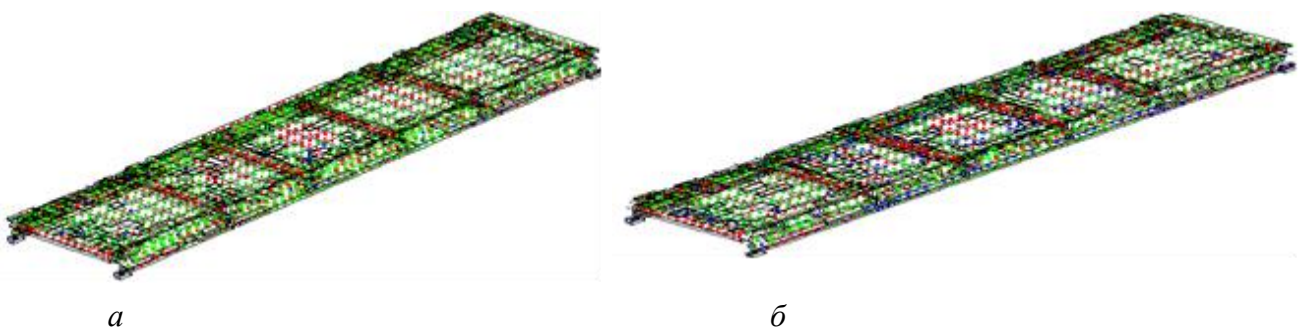


Рис. 11. Розподіл тріщин у бетоні залізобетонної ребристої плити у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі: *а* – 10 хв, *б* – 25 хв

Аналізуючи картини розподілів тріщин, що наведені на рис. 11 можна зазначити, що, спираючись лише на дані розподіли, неможливо однозначно ідентифікувати появу наскрізних тріщин. Поява ушкодження в одній або декількох точках інтегрування не дає підстав зробити висновок, що тріщини будуть наскрізними. Отримані тріщини необхідно розглядати, як ефективну характеристику, яка дає змогу адекватно описати поведінку залізобетону під час термосилового впливу пожежі.

Для розуміння механізму руйнування внутрішніх шарів плити було побудовано криві вертикальних переміщень залізобетонної ребристої плити для різних умов навантаження. На рис. 12 наведено побудовані криві.

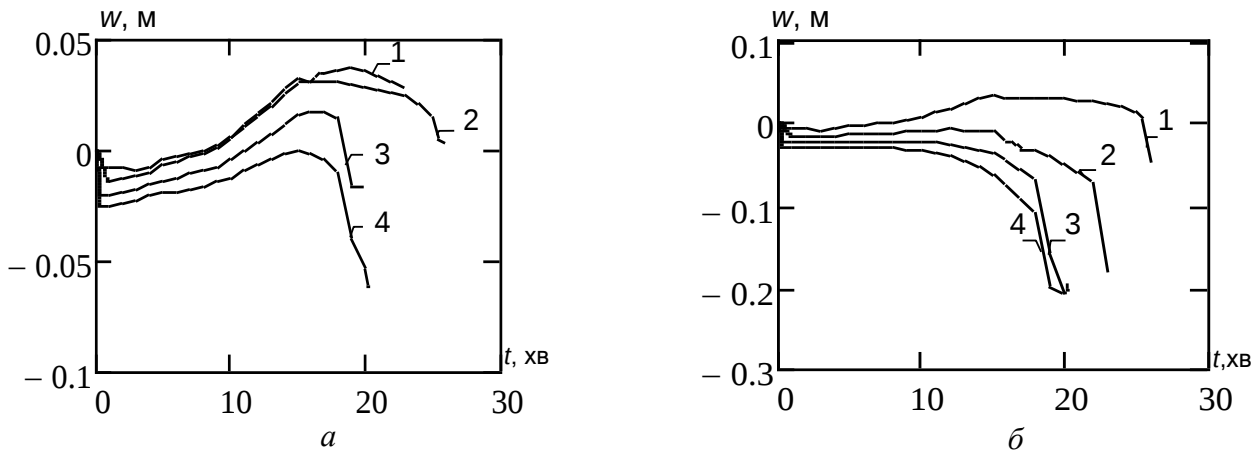


Рис. 12. Графіки максимального прогину залізобетонної ребристої плити під впливом стандартного температурного режиму пожежі: а – у зоні поздовжнього ребра, б – у точці посередині панелі в комірці між ребрами плити при різних рівнях діючого навантаження: 1 – 30 % від максимального; 2 – 50 % від максимального; 3 – 70 % від максимального; 4 – 90 % від максимального

Аналіз графіків на рис. 12 показує, що, ймовірно, руйнування поздовжнього ребра плити можливе лише за умови прикладення навантаження понад 70 %, оскільки чіткий загин кривої максимального прогину спостерігається саме у цьому випадку. Водночас, можна впевнено стверджувати, що панель у комірці між ребрами має чітко виражений загин.

Це означає, що у всіх випадках руйнування плити відбувається саме внаслідок руйнування панелі між ребрами.

Тож можна припустити, що граничний стан з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності настає внаслідок руйнування панелі між ребрами, коли несуча здатність поздовжніх ребер зберігається.

Для вивчення механізму руйнування були побудовані розподіли величини вертикальних переміщень залізобетонних ребристих плит за різного рівня прикладеного діючого навантаження. Побудовані розподіли наведені на рис. 13.

Можна побачити, що на рис. 13, характер руйнування панелі між ребрами залізобетонної ребристої плити відповідає характеру руйнувань при вогневих випробування таких плит, що описані у роботі Jansson R.

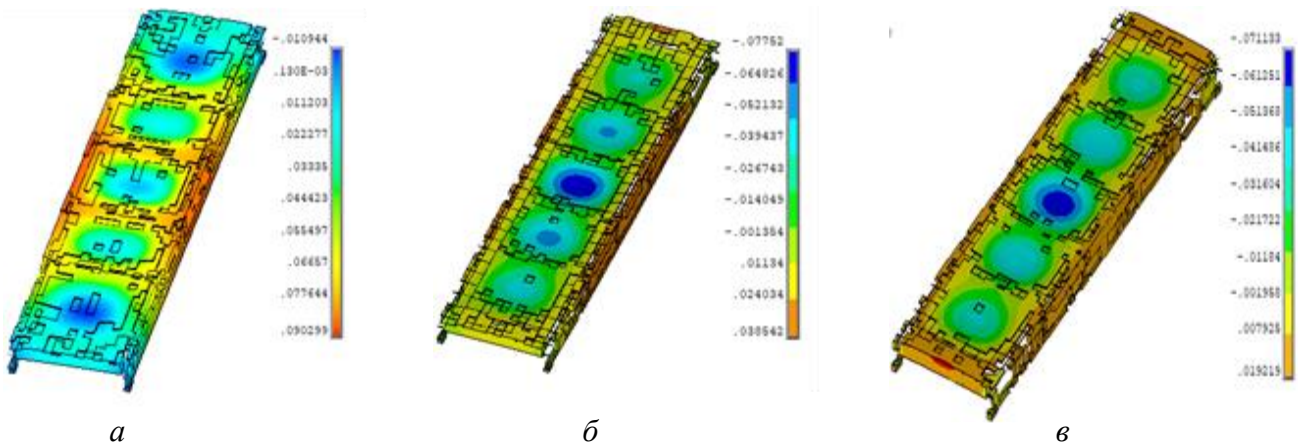


Рис. 13. Розподіли вертикальних переміщень (м) залізобетонній ребристій плиті, що досліджується, в момент руйнування при різних рівнях прикладеного діючого навантаження: *a* – 30 % від максимального навантаження; *б* – 50 % від максимального навантаження; *в* – 70 % від максимального навантаження

Проведені дослідження показали високу точність відтворення процесів, що відбуваються в залізобетонних ребристих плитах, а також можливість використання такого підходу як уточненого методу для оцінювання вогнестійкості залізобетонних ребристих плит за граничним станом втрати цілісності. У межах такого підходу можна використовувати криві типу графіків, поданих на рис. 14. На рис. 14 наведено відповідні криві, де показано умови настання граничного стану втрати цілісності та метод ідентифікації межі вогнестійкості за даними кривими.

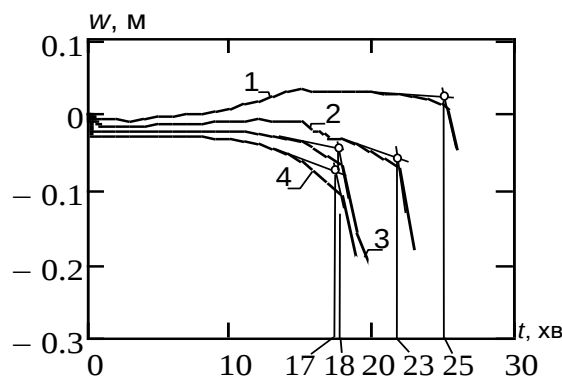


Рис. 14. Графіки максимального прогину точки посередині панелі у комірці між ребрами залізобетонної ребристої плити під впливом стандартного температурного режиму пожежі при різних значеннях діючого навантаження із встановленими межами вогнестійкості: 1 – 30 % від максимального навантаження; 2 – 50 % від максимального навантаження; 3 – 70 % від максимального навантаження; 4 – 90 % від максимального навантаження

Таким чином, за результати проведених досліджень вперше розроблено метод оцінювання вогнестійкості залізобетонних ребристих плит за критерієм втрати цілісності, який базується на математичному моделюванні, що підтверджено експериментальними дослідженнями, та враховує особливості механізму утворення наскрізних тріщин і дефектів у таких конструкціях. Враховуючи отримані результати під час математичного моделювання напружено-деформованого стану у

залізобетонних ребристих плитах, які наведені із настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності. Згідно із отриманими даними втрата цілісності відбувається при руйнуванні панелі між ребрами плити. Весь процес деформування та руйнування плити проходить у декілька етапів.

На першому етапі відбувається деформація плити під впливом діючого навантаження у вигляді її згину донизу. Після початку теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі, внаслідок температурного розширення бетону, згин плити поступово зменшується, і в певний момент вона починає вигинатися вгору.

Водночас під впливом нагріву утворюються комірки між ребрами, в яких панель згинається вниз і набуває форму лунок. Руйнування утворених комірок панелі між ребрами плити відбувається шляхом утворення тріщин уздовж границь цих комірок. Часткові руйнування панелі за таким механізмом зумовлює втрату її цілісності. Критерієм руйнування панелі між ребрами залізобетонної ребристої плити є перевищення сумарної віртуальної роботи зовнішніх сил над сумарною віртуальною роботою внутрішніх сил. Віртуальні роботи обчислюються на можливих переміщеннях кінематичної системи, яка утворюється на лініях «пластичних шарнірів».

Елементарні роботи внутрішніх сил для однієї симетричної чверті системи фасеток у певній точці $A(x(u), y(u))$ в ортогональних напрямках визначаються за виразами:

$$dW_x = \frac{m_x}{L_{rx}(u)} dl(u) + \frac{m_x}{L_{rx}(u)} x_0, \quad dW_y = \frac{m_y}{L_{ry}(u)} dl(u) + \frac{m_y}{L_{ry}(u)} y_0. \quad (4)$$

Тут елементарна ділянка кривої та довжина на схемі елементарної кінематичної системи (рис. 40) визначаються формулами:

$$dl(u) = \sqrt{\left(\frac{dx(u)}{du}\right)^2 + \left(\frac{dy(u)}{du}\right)^2}, \quad L_{rx}(u) = y(u), \quad L_{ry}(u) = x(u). \quad (5)$$

У рівняннях (4) m_x та m_y – погонні граничні моменти, які визначаються за формулами:

$$m_x = \frac{M_{Rd, fi, x}}{l_s}, \quad m_y = \frac{M_{Rd, fi, y}}{l_s}, \quad (6)$$

де $M_{Rd, fi, x}$ та $M_{Rd, fi, y}$ – граничні моменти фрагментів панелі у комірці між ребрами залізобетонної ребристої плити у ортогональних напрямках уздовж арматурних стержнів.

Враховуючи формули (4) та (5), формула для визначення віртуальних робіт внутрішніх сил симетричної чверті механічної системи, що складається з фасеток, має вигляд:

$$W = W_x + W_y, \quad (7)$$

де W_x – віртуальна робота внутрішніх сил у напрямку x ;

W_y – віртуальна робота внутрішніх сил у напрямку y .

Елементарні роботи зовнішніх сил для однієї симетричної чверті системи фасеток у певній точці $A(x(u), y(u))$ в ортогональних напрямках визначаються за виразами:

$$dU_x = \frac{1}{2} Q_{Ed} \frac{dx(u)}{du} y(u), \quad dU_y = \frac{1}{2} Q_{Ed} \frac{dy(u)}{du} x(u). \quad (8)$$

Враховуючи формули (8), формула для визначення віртуальних робіт зовнішніх сил симетричної чверті механічної системи, має вигляд:

$$\begin{aligned} U &= U_x + U_y, \\ U_x &= \frac{1}{2} Q_{Ed} \int_0^1 \frac{dx(u)}{du} y(u) du, \\ U_y &= \frac{1}{2} Q_{Ed} \int_0^1 \frac{dy(u)}{du} x(u) du, \end{aligned} \quad (9)$$

де U_x і U_y – складові віртуальної роботи у відповідних напрямках x і y ;

Q_{Ed} – прикладене механічне навантаження; інтеграли описують взаємодію координатних змінних $x(u)$ і $y(u)$ з їх похідними за параметром u .

Для визначення відповідності до заданого класу вогнестійкості має бути перевірена відповідна умова, що має такий вигляд:

$$W \geq U. \quad (10)$$

Висновок про настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності залізобетонної ребристої плити робиться за умови, коли величина віртуальних робіт зовнішніх сил (U) є більшою за величину віртуальних робіт внутрішніх сил (W).

Отже у цьому розділі також вперше розроблено спрощений метод оцінювання вогнестійкості залізобетонних ребристих плит за настанням граничного стану втрати цілісності на основі розробленої математичної моделі (4) – (10) для обчислення віртуальних робіт внутрішніх та зовнішніх сил у панелі плити.

У шостому розділі «Ієрархічна структура розрахункових методів оцінювання вогнестійкості огорожувальних горизонтальних конструкцій за настанням граничного стану втрати цілісності» дослідження, результати якого наведені у 4 та 5 розділах, показали, що створення наскрізних тріщин можливе при використанні уточненого та спрощеного підходів.

Найбільш точний результат можна отримати при використанні уточненого підходу, комбінуючи неявний та явний методи інтегрування рівнянь механіки

процесів, що відбуваються у залізобетонних порожнистих та ребристих плитах під час теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі.

У настанові EN 1992-1-2 наведена табл. 5.9 щодо певних мінімальних геометричних розмірів плит для забезпечення відповідного класу вогнестійкості. Проте, дана таблиця щодо оцінювання вогнестійкості може бути уточнена, враховуючи отримані дані про втрату цілісності, за допомогою підходів, запропонованих у 4 та 5 розділах цієї роботи.

Для комплексного дослідження було запропоновано відстежити закономірність залежності межі вогнестійкості залізобетонних порожнистих та ребристих плит від їхніх найбільш значущих геометричних параметрів, у даному випадку це осьова відстань арматурних стержнів та товщини плити для порожнистих, а також товщини перерізу панелі між ребрами та осрової відстані від арматури до обігрівної поверхні панелі між ребрами для ребристих плит.

Згідно із прийнятим припущенням межа вогнестійкості пов'язана із геометричними параметрами залізобетонних порожнистих та ребристих плит лінійною поліноміальною залежністю типу:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2, \quad (11)$$

де x_1 , x_2 – фактори, які відповідають початковим параметрам залізобетонних порожнистих плит, у нашому випадку це осьова відстань арматурних стержнів та товщина плити.

У табл. 1, 2 наведені інтервали факторів для здійснення повного факторного експерименту для порожнистих та ребристих плит відповідно.

Табл. 1. Інтервали варіювання факторів у повному факторному експерименті для порожнистих плит

Товщина плити, H , мм			Осьова відстань, w , мм		
Найменше значення, H_{-1}	Середнє значення, H_0	Найбільше значення H_1 ,	Найменше значення, w_{-1}	Середнє значення, w_0	Найбільше значення, w_1
220	260	300	10	20	30

Табл. 2. Інтервали варіювання факторів у повному факторному експерименті для ребристих плит

Товщина панелі у комірці між ребрами плити, H , мм			Осьова відстань арматурних стержнів до обігрівної поверхні панелі між ребрами плити, w , мм		
Найменше значення, H_{-1}	Середнє значення, H_0	Найбільше значення, H_1	Найменше значення, w_{-1}	Середнє значення, w_0	Найбільше значення, w_1
30	55	80	10	15	20

При використанні результатів повного факторного експерименту обчислено відповідні коефіцієнти регресійної залежності для досліджуваних залізобетонних порожнистих та ребристих плит за формулами:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i ; b_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 y_i ; b_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 y_i ; b_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 y_i , \quad (12)$$

де $N = 4$ – кількість експериментальних ситуацій відповідно до матриці повного факторного експерименту;

x_i – величини відповідного фактора згідно із матрицею плану та діапазонами їхнього варіювання (табл. 1 та табл. 2);

y_i – значення межі вогнестійкості за результатами відповідних числових експериментів.

При застосуванні формул (12), були обчислені коефіцієнти регресії.

Побудована регресія дозволяє прослідкувати залежність межі вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит від товщини плити та осьової відстані арматурних стержнів та ребристих плит від товщини панелі у комірках між ребрами та осьової відстані арматурних стержнів у даній панелі. Це зручно зробити за допомогою відповідних побудованих поверхонь, які наведені на рис. 15 для порожнистих та ребристих плит відповідно.

На побудованих поверхнях видно, що вони мають майже точну плоску форму.

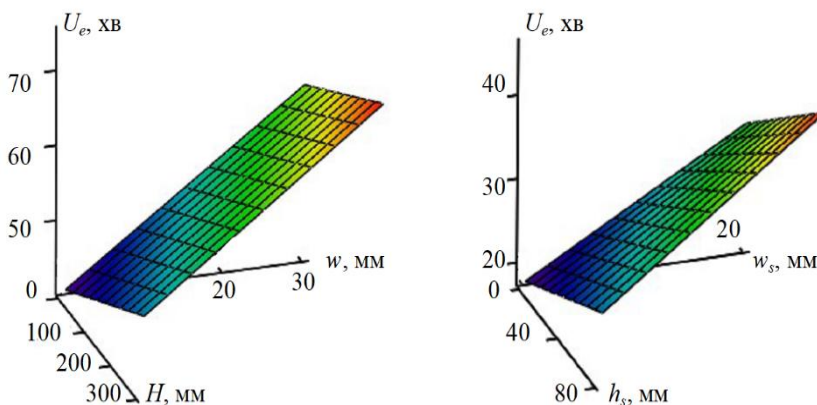


Рис. 15. Поверхні залежності межі вогнестійкості залізобетонних плит за настанням граничного стану втрати цілісності: а – від товщини (H) та осьової відстані арматурних стержнів (w) порожнистих плит; б – від товщини панелі у комірках (h_s) між ребрами та осьової відстані арматурних стержнів (w_s) у панелі для ребристих плит

Результати аналізу адекватності вказують на те, що похибка розрахункового оцінювання вогнестійкості для залізобетонних порожнистих та ребристих плит, розрахованих за регресійною залежністю, не перевищує 15 %.

Отримана регресійна залежність може бути застосована для розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит за граничним станом за ознакою втрати цілісності. При застосуванні номограм, зображених на рис. 15, були уточнені табл. наведені у настанові EN 1992-1-2. Уточнені таблиці представлені нижче у вигляді табл. 3, 4 для залізобетонних порожнистих та ребристих плит відповідно. Проведені дослідження, результати яких представлені у 4, 5 та 6 розділах, дозволяють сформулювати ієрархічний підхід до методів розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих та ребристих плит за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності.

Табл. 3. Мінімальні розміри та осьові відстані для залізобетонних порожнистих плит

Стандартна вогнестійкість	Мінімальні розміри (мм)	
	Товщина плити h_s	Осьова відстань a
REI 30	220	15
REI 45	220	20
REI 60	220/300	30/20
REI 90	300	35

Табл. 4. Мінімальні розміри та осьові відстані для залізобетонних ребристих плит

Стандартна вогнестійкість	Мінімальні розміри (мм)				
	Можливі сполучення ширини ребер b_{min} та осьової відстані a			Товщина h_s та осьова відстань w_s в полиці плити	
REI 15	$b_{min}=80$ $a=15$			$h_s=30$ $w_s=15$	$h_s=50$ $w_s=10$
REI 30	$b_{min}=80$ $a=15$			$h_s=50$ $w_s=15$	
REI 45	$b_{min}=80$ $a=15$			$h_s=50$ $w_s=25$	
REI 60	$b_{min}=100$ $a=35$	120 25	≥ 200 15*	$h_s=80$ $w_s=10^*$	

Основним інструментом для досягнення такого результату є розроблені математичні моделі утворення тріщин, які мають наскрізний характер, що призводять до настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності. Загалом, дані моделі, що отримані шляхом узагальнення великого обсягу експериментальних та розрахунково-теоретичних даних, застосовуються для розробки спрощених методів.

Згідно із настановами, що містять нормативні документи, ієрархічна система методів розрахункового оцінювання за втратою несучої здатності є структурою, в основі якої знаходяться спрощені методи, а на вершині уточнені. Таку саму систему пропонується використовувати і для оцінювання вогнестійкості за граничним станом за ознакою втрати цілісності для горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій, зокрема порожнистих та ребристих плит. На рис. 16 представлена ієрархічна система методів розрахункового оцінювання вогнестійкості вказаних конструкцій за граничним станом за ознакою втрати цілісності.

Кожний з методів ієрархічної системи розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих та ребристих плит за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності має три основних аспекти: набір початкових даних, розрахунковий алгоритм та спосіб інтерпретації результатів розрахунку, тобто критеріальна база, що вказує на настання або ненастання граничного стану за ознакою втрати цілісності.

Основою розробленої системи є табличний і спрощені методи, а уточнені методи на верхньому рівні базуються на явному та неявному інтегруванні рівнянь механіки деформованого тіла.

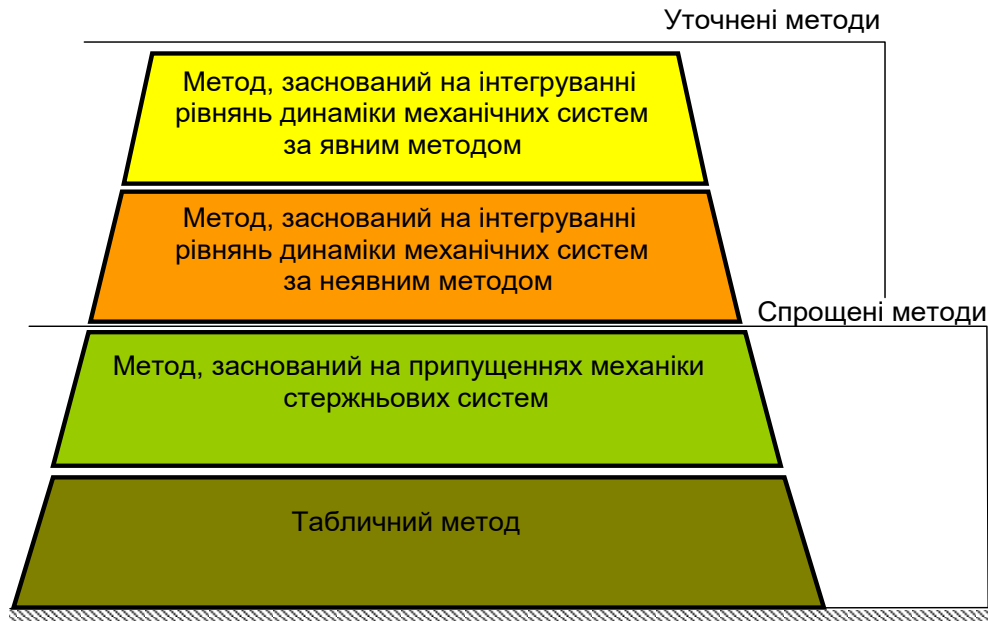


Рис. 16. Ієрархічна система методів оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих та ребристих плит за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності

Розроблена ієрархічна система методів розрахункового оцінювання дозволяє визначати вогнестійкість горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій, зокрема порожнистих та ребристих плит із використанням методів різного рівня складності та точності за настанням граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності.

У цьому розділі «Процедура реалізації розробленої ієрархічної системи методів розрахункового оцінювання вогнестійкості горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій» представлено розроблені схеми алгоритму для реалізації розробленої ієрархічної системи. Реалізація табличного методу оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності має найпростіший алгоритм. Як початкові дані використовуються три основні параметри: H – товщина плити; w – осьова відстань арматурних стержнів до обігрівної поверхні; REI – клас вогнестійкості, який необхідно забезпечити.

Для реалізації алгоритму табличного методу використовується табл. 3. Для потрібного класу вогнестійкості вибирається відповідний рядок, в якому наведені мінімальні значення товщини плити та осової відстані арматурних стержнів. Якщо реальні параметри перевищують табличні, то необхідний клас вогнестійкості вважається забезпеченим. Такий самий принцип передбачається і при реалізації табличного методу оцінювання вогнестійкості для залізобетонних ребристих плит за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності. У вигляді початкових даних використовуються чотири параметри: b_{min} – товщина ребра плити; a – осьова відстань арматурних стержнів ребра до обігрівної поверхні; h_s – товщина панелі плити між ребрами плити; w_s – осьова відстань арматурних стержнів панелі до обігрівної поверхні; REI – клас вогнестійкості, який потрібно забезпечити.

Принцип реалізації алгоритму табличного методу для ребристих плит такий самий, як і для порожнистих, але використовується таблиця 4. Для потрібного

класу вогнестійкості вибирається відповідний рядок, у якому наведені мінімальні значення геометричних параметрів. Якщо реальні параметри перевищують табличні, то необхідний клас вогнестійкості вважається забезпеченим. Реалізація спрощеного методу оцінювання вогнестійкості порожнистих плит за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності за появою поперечних та поздовжніх тріщин може бути здійснена за алгоритмами-схемами, які наведені на рис. 17, 18.

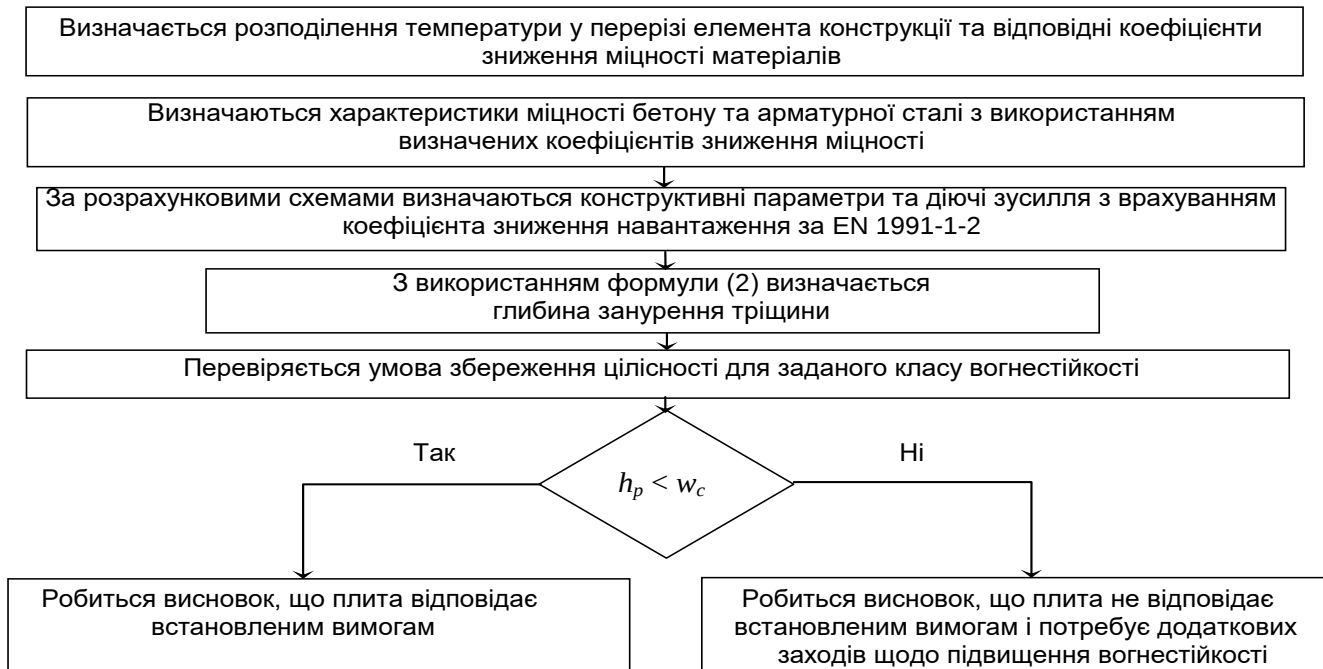


Рис. 17. Схема алгоритму реалізації методу для розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити за граничним станом втрати цілісності при появі поперечних тріщин

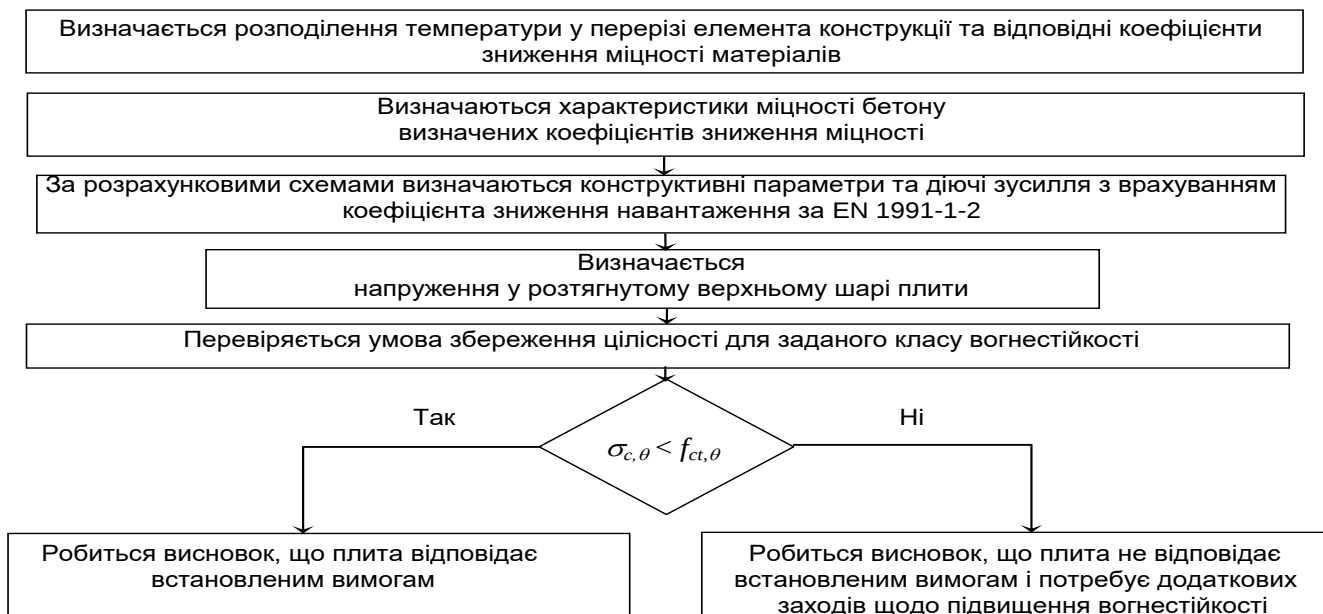


Рис. 18. Схема алгоритму реалізації методу для розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити за граничним станом втрати цілісності при появі поперечних тріщин

Обидва методи, викладені у роботі, повинні застосовуватися у комплексі. У разі, якщо один із них дає негативний результат, вважається, що плита не відповідає встановленим вимогам щодо вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності.

При реалізації алгоритму розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонної ребристої плити за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності за енергетичним критерієм може бути використана схема, подана на рис. 19.

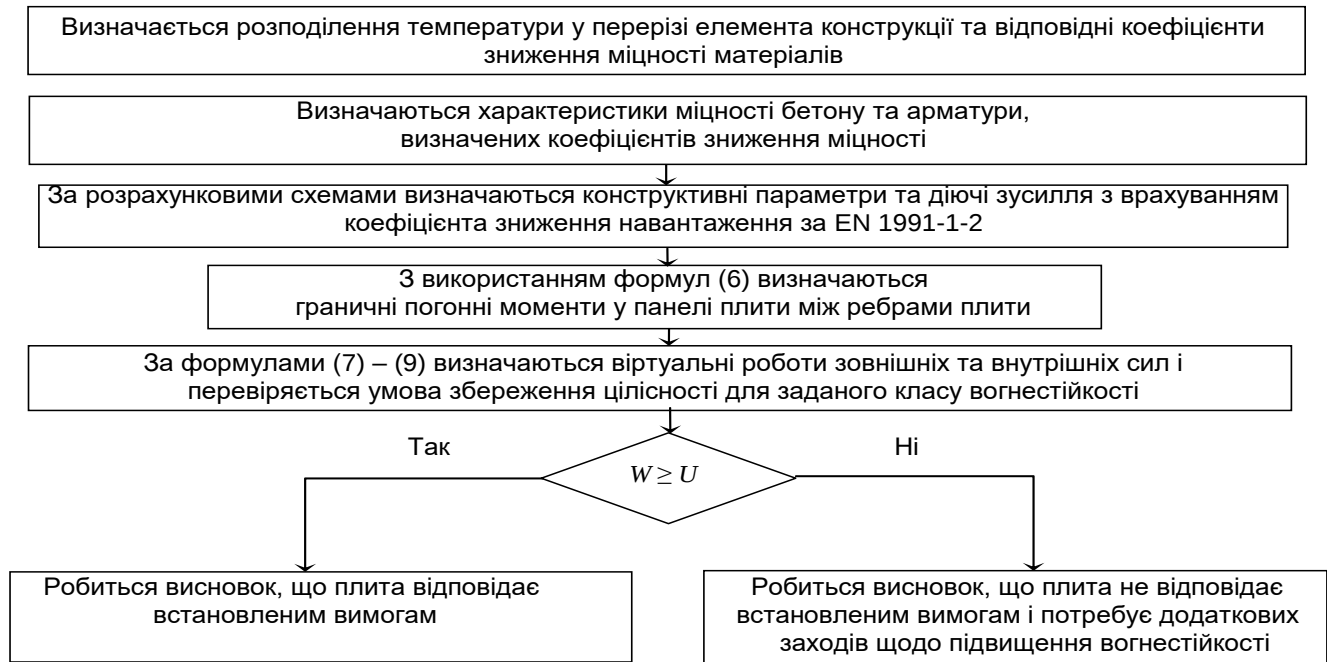


Рис. 19. Схема алгоритму реалізації методу для розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонної ребристої плити за граничним станом втрати цілісності за енергетичним критерієм

Наступний щабель за ієрархією методів розрахункової оцінки вогнестійкості залізобетонних порожнистих та ребристих плит за граничним станом за ознакою втрати цілісності зумовлює використання уточнених методів. У розділах 4, 5 даної роботи представлено, що ці методи дозволяють за результатами розрахунку ідентифікувати момент настання граничного стану за ознакою втрати цілісності на основі утворення наскрізних тріщин і дефектів, спричинених видаленням скінчених елементів при досягненні критичних пластичних деформацій. Реалізація такого методу може бути здійснена за алгоритмом, представленим на схемі для горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій, що відображено на рис. 20.

На вершині ієрархічної системи методів розрахункового оцінювання вогнестійкості для горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій за граничним станом втрати цілісності на продемонстрованій схемі метод, що використовує явне інтегрування рівнянь динаміки. У 2 розділі роботи представлено, що такий метод також дозволяє за результатами розрахунку ідентифікувати момент

настання граничного стану втрати цілісності. Даний метод дозволяє уникнути труднощів із збіжністю процесів. Також даний метод дозволяє отримати прямі ознаки настання граничного стану втрати цілісності. Описаний алгоритм може бути здійснений за допомогою схеми, представленої на рис. 20.



Рис. 20. Схема алгоритму реалізації уточненого методу вогнестійкості при неявному та явному інтегруванні для горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій за граничним станом втрати цілісності

Практична цінність дисертаційних досліджень полягає у створенні наукових основ для розробки методичної бази щодо розрахункового оцінювання вогнестійкості горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій, зокрема залізобетонних порожнистих та ребристих плит за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності. Це у свою чергу дозволяє підвищити рівень пожежної безпеки об'єктів шляхом підвищення точності встановлення відповідності будівельних конструкцій до вимог щодо їхньої вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності.

Розроблена методична база може бути підґрунтям для вдосконалення системи норм та стандартів, які застосовуються у проєктуванні вогнестійких залізобетонних конструкцій. Запропонована у дисертаційній роботі ієрархічна система розрахункових методів, органічно інтегрується у чинні норми (нормативні документи).

ВИСНОВКИ

У результатах проведених досліджень, представлених у даній дисертаційній роботі, яка є завершеним науковим дослідженням, описано етапи розв'язання актуальної наукової проблеми – створення передумов для розробки ієрархічної

системи методів розрахункової оцінки вогнестійкості горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій, зокрема порожнистих і ребристих плит за граничним станом за ознакою втрати цілісності шляхом розвитку теоретичних основ прогнозування утворення наскрізних тріщин і дефектів у таких типах конструкцій за відсутності крихкого руйнування під час пожежі. Виявлено закономірності утворення цих тріщин залежно від конструктивних параметрів даних елементів, а також розроблено систему критеріїв для фіксації цього граничного стану вогнестійкості за результатами розрахунків.

Основні наукові та практичні результати роботи зводяться до наступного.

1. У результаті аналізу методів оцінки вогнестійкості залізобетонних конструкцій за умов впливу пожежі за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності представлено, що існуюча система критеріїв експериментальних та розрахункових методів оцінки вогнестійкості горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій за вказаним граничним станом не дає змоги однозначно зафіксувати утворення наскрізних дефектів, а також відповідно, настання граничного стану за ознакою втрати цілісності.

Перспективним напрямком розв'язання цієї проблеми є удосконалення та розвиток теоретичних уявлень про стан, коли тріщини в огорожувальних залізобетонних конструкціях стають наскрізними, із одночасним створенням на їх основі ефективних розрахункових методів оцінювання вогнестійкості горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій.

2. Розроблено методику та математичну модель для проведення математичного моделювання поведінки залізобетонних порожнистих плит під впливом пожежі з використанням явного методу інтегрування рівнянь напружено-деформованого стану деформованого твердого тіла. За результатами проведених розрахунків отримано дані, які дають можливість прогнозувати утворення та розвиток тріщин, які мають наскрізний характер у таких конструкціях.

Визначено, що механізм утворення поперечних тріщин пов'язаний із формуванням призми руйнування з кутом при вершині $\sim 61^\circ$. Утворення цієї призми руйнування зафіксовано на 45-й хвилині впливу пожежі та пов'язано з утворенням косих поперечних тріщин, що може свідчити про настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності. Це передусе настанню критичного прогину залізобетонної порожнистої плити (230,114 мм), а саме – настанню граничного стану вогнестійкості за ознакою втрати несучої здатності за 5 хвилин.

3. Розроблено методику проведення експериментальних досліджень поведінки залізобетонної порожнистої плити в умовах вогневих випробувань. Методика включає аналіз температурних показників, параметрів напружено-деформованого стану, а також дослідження передумов утворення та розвитку наскрізних тріщин, що можуть бути пов'язані з настанням граничного стану вогнестійкості за ознакою втрати цілісності в умовах впливу пожежі.

За результатами досліджень встановлено, що граничний стан за ознакою втрати несучої здатності настає на 50-й хвилині через досягнення критичного прогину (230,114 мм) порожнистої плити.

Аналіз експериментальних даних підтвердив адекватність математичного моделювання поведінки залізобетонної порожнистої плити, розробленої за запропонованою методикою. Відносна похибка не перевищує 15 %, а критерій Фішера не перевищує табличного значення при рівні значущості 0,05.

Також встановлено, що утворення наскрізних тріщин відбувається в середній частині прольоту конструкції за механізмом утворення призми руйнування з кутом при вершині $\sim 61^\circ$. Процес супроводжується активним зростанням висоти поперечних тріщин, починаючи з 35-ї хвилини, тобто за 15 хвилин до втрати несучої здатності. Крім того, виявлено механізм утворення поздовжніх наскрізних тріщин, які виникають унаслідок температурного розширення бетону та арматури в нижніх шарах залізобетонної порожнистої плити. Їх утворення зафіксовано на 46-й хвилині, що можна пов'язати з настанням граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності.

4. Розроблено математичні моделі та уточнено методи оцінювання вогнестійкості горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій. На відміну від існуючих, підходів, запропоновані моделі дозволяють врахувати настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності. Математичне моделювання утворення тріщин та/або дефектів виконано із застосуванням методу скінченних елементів із використанням неявного інтегрування рівнянь механіки та базуючись на виявлених механізмах руйнування залізобетонної порожнистої та ребристої плит. Шляхом візуального аналізу отриманих розрахункових даних встановлюється положення повністю зруйнованих скінченних елементів у бетоні. за рахунок отриманих критичних величин пластичних деформацій – $2,5 \cdot 10^{-3}$, що дозволяє перевіряти умову появи наскрізних тріщин та/або дефектів, що призводять до настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності.

Встановлено, що при рівні навантаження 50 % від несучої здатності конструкцій наскрізні тріщини в порожнистих плитах утворюються внаслідок формування призми руйнування на 45-й хвилині, а поздовжні тріщини, спричинені температурним розширенням бетону та арматури у нижніх шарах плити, – на 44-й хвилині. Це на 5 та 6 хвилин відповідно передувє втраті несучої здатності, що ставить під сумнів відповідність класу вогнестійкості REI 45, оскільки межа вогнестійкості, визначена за результатами вогневих випробувань, склала 50 хвилин. У ребристих плитах втрату цілісності зафіксовано на 23-й хвилині внаслідок локального деформування панелі в комірці між ребрами, що супроводжувалося утворенням лунок та локальних зон пластичної деформації вздовж їхніх границь. Водночас втрати несучої здатності через прогини основної несучої частини ребристої плити, тобто її поздовжніх ребер, протягом 30 хвилин впливу пожежі зафіксовано не було.

5. Розроблено спрощені методи оцінювання вогнестійкості горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій, засновані на визначенні критеріїв настання граничного стану за ознакою втрати цілісності:

для порожнистих плит:

– розроблено математичну модель, що виражає критерій утворення поперечної тріщини. Ця модель дозволяє визначити глибину поширення тріщини відносно необігрівної поверхні плити. Якщо ця глибина тріщини перевищує товщину стінки

між поверхнею плити та порожниною, це спричиняє настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності;

– розроблено математичну модель, що виражає критерій утворення поздовжньої тріщини, яка виникає внаслідок температурного розширення нижніх шарів плити. Модель дозволяє визначати напруження в розтягнутій зоні стінки між порожниною та поверхнею плити у верхній її частині. Отримане значення напруження порівнюється з межею міцності бетону на розтяг враховуючи її зниження через нагрівання. Якщо обчислене напруження перевищує межу міцності бетону на розтяг, фіксується утворення магістральної поздовжньої тріщини та настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності;

для ребристих плит:

– розроблено математичну модель, що визначає критерій утворення наскрізної тріщини. Критерієм настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності є енергетичний підхід, що базується на порівнянні віртуальних робіт внутрішніх та зовнішніх сил у полиці плити між ребрами, визначених за принципом можливих переміщень. Якщо величина віртуальних робіт зовнішніх сил перевищує величину віртуальних робіт внутрішніх сил, фіксується настання граничного стану за ознакою втрати цілісності залізобетонної ребристої плити.

6. Виявлено закономірності настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності для горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій, що дозволило створити регресійну залежність зміни межі вогнестійкості залежно від конструктивних параметрів конструкцій, зокрема:

– для порожнистих плит залежно від висоти перерізу (H) та осьової відстані від арматури до обігрівної поверхні плити (w), що описується регресійною залежністю:

$$U_e = 3,37 + 0,119 \cdot H + 1,01 \cdot w + 0,000625 \cdot H \cdot w;$$

– для ребристих плит залежно від товщини перерізу панелі між ребрами (h_s) та осьової відстані від арматури до обігрівної поверхні панелі між ребрами (w_s), що описується регресійною залежністю: $U_e = 1,2 + 0,06 \cdot h_s + 1,2 \cdot w_s + 0,01 \cdot h_s \cdot w_s$.

Ці залежності стали основою для розробки табличного методу оцінювання вогнестійкості для залізобетонних порожнистих та ребристих плит за граничним станом за ознакою втрати цілісності, залежно від їхніх конструктивних параметрів.

7. Розроблено ієрархічну систему методів оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих та ребристих плит, яка відрізняється від існуючих підходів, закладених у другій частині Єврокоду 2. Наявна система враховує лише два граничні стани – втрату теплоізолювальної та несучої здатності, тоді як розроблена система додатково враховує умови настання граничного стану за ознакою втрати цілісності.

Основою розробленої системи є табличний і спрощені методи, а на верхньому рівні – уточнені методи, які базуються на неявному та явному підходах до інтегрування рівнянь механіки деформованого тіла.

Розроблена система дозволяє забезпечити відповідність нормативним вимогам щодо вогнестійкості будівельних конструкцій та підвищує точність оцінювання вогнестійкості:

- на 12 % для порожнистих плит порівняно з результатами вогневих випробувань;
- на 16,1 % для ребристих плит порівняно з результатами математичного моделювання.

Розроблена система дає змогу отримувати уточнені дані щодо утворення наскрізних дефектів ще до настання втрати несучої здатності, що, своєю чергою, дозволяє більш точно оцінювати ризики втрати цілісності конструкцій під час пожежі. Такий підхід сприяє підвищенню рівня пожежної безпеки будівель, оскільки своєчасне виявлення критичних станів конструкцій дає змогу впроваджувати превентивні заходи.

8. Застосування розробленої системи методів сприяє підвищенню пожежної безпеки будівельних об'єктів завдяки точнішому оцінюванню вогнестійкості залізобетонних плит, зменшенню ризиків поширення вогню, створенню умов для безпечної евакуації людей під час пожежі, а також забезпеченню ефективної роботи рятувальних підрозділів у процесі її гасіння. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення нормативної бази у сфері проектування вогнестійких конструкцій, що сприятиме підвищенню безпеки будівельних об'єктів та ефективності їх експлуатації.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у періодичних виданнях, включених до категорії «А» переліку наукових фахових видань України, або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Scopus та/або Web of Science Core Collection

1. Nekora V., **Sidnei S.**, Shnal T., Nekora O., Dankevych I., Pozdieiev S. Determination of features of composite steel and concrete slab behavior under fire condition. *Scientific journal «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies»*. 2021. Vol. 6. № 7 (114). P. 59–67. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем розроблено методики проведення обчислювальних експериментів з розподілу температури у двотаврових гофрованих сталевих балках в умовах вогневих випробувань.

2. Nekora V., **Sidnei S.**, Shnal T., Nekora O., Lavrinenko L., Pozdieiev S. Thermal effect of a fire on a steel beam with corrugated wall with fireproof mineral-wool cladding. *Scientific journal «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies»*. 2021. Vol. 5. № 1 (113). P. 24–32. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем створено регресійні залежності для оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит і сходових кліток відповідно до найбільш значущих конструктивно-геометричних параметрів.

3. Nesen I., **Sidnei S.**, Petukhova O., Zhuravskij M., Tishchenko E. Refining a tabular method for assessing the fire resistance of reinforced concrete structures.

Scientific journal «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies». 2023. Vol. 4. № 7 (124). P. 72–78. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем створено регресійні залежності для оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит і сходових кліток відповідно до найбільш значущих конструктивно-геометричних параметрів.

4. Nuianzin O., Pozdieiev S., **Sidnei S.**, Kostenko T., Borysova A., Samchenko T. Increasing the efficiency and environmental friendliness of fire resistance assessment tools for load-bearing reinforced concrete building structures. *Scientific journal «Ecological Engineering & Environmental Technology»*. 2023. Vol. 24(4). P. 138–146. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем встановлено закономірності залежності дисперсії температури в камері згоряння печі від визначених параметрів.

5. **Sidnei S.**, Berezovskyi A., Kasiarum S., Chastokolenko I. Revealing patterns in the behavior of a reinforced concrete slab in fire based on determining its stressed and deformed state. *Scientific journal «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies»*. 2023. Vol. 5. № 7 (125). P. 43–49. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем розроблено розрахункова модель для проведення обчислювальних експериментів з оцінювання вогнестійкості залізобетонної ребристої плити, виконано обробка результатів та визначено закономірності межі вогнестійкості від рівня механічного навантаження.

6. **Sidnei S.**, Myroshnyk O., Kovalov A., Veselivskyi R., Hryhorenko K., Shnal T., Matsyk I. Identifying the evolution of through cracks in iron-reinforced hollow slabs under the influence of a standard fire temperature mode. *Scientific journal «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies»*. 2024. Vol. 4. № 7 (130). P. 70–77. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем проведено комп'ютерне моделювання поведінки залізобетонної порожнистої плити в умовах пожежі та розроблено метод оцінювання вогнестійкості таких конструкцій за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності.

7. **Sidnei S.**, Gonchar S., Zhuravskij M., Matsyk I., Nozhko I., Petukhova O., Shnal T., Vykhrystenko V. Defining a pattern in the loss of integrity by ribbed plates under fire conditions. *Scientific journal «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies»*. 2024. Vol. 5. № 7 (131). P. 15–24. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем проведено комп'ютерне моделювання поведінки залізобетонної ребристої плити в умовах пожежі та розроблено метод оцінювання вогнестійкості таких конструкцій за настанням граничного стану втрати цілісності.

Монографія

8. **Sidnei S.**, Pelypenko M., Grygorian M., Kropyva M., Taran I., Holovchenko S. Hierarchical structure of calculation methods for assessing the fire resistance of enclosure horizontal structures under the limit state of loss of integrity. Scientific monograph «Assessment of technical condition: means of measurement, safety, risks». *Technology center PC*. 2024. P. 64–96.

Особисто здобувачем розроблено ієрархічна система методів оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності для залізобетонних порожнистих та ребристих плит.

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України

9. Нуянзін О. М., Кришталь М. А., Болжаларський К. В., Сідней С. О. Дослідження впливу конфігурації вогневої печі на рівномірність температурного поля по обігрівальній поверхні залізобетонної стіни при її випробуваннях на вогнестійкість. *Науковий вісник: «Цивільний захист та пожежна безпека»*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2016. Том № 1 (1). С. 38–43.

Особисто здобувачем виконано комп'ютерне моделювання з метою визначення впливу конструктивних особливостей вертикальної випробувальної установки на рівномірність розподілу температур у печі при впливі стандартного температурного режиму пожежі.

10. Шналь Т. М., Поздєєв С. В., Яковчук Р. С., Некора О. В., Сідней С. О. Математичне моделювання розвитку пожежі у триповерховій житловій будівлі при проведенні у ній повномасштабних вогневих випробувань. *Збірник наукових праць: «Пожежна безпека»*. Львів: ЛДУ БЖД. 2020. Том № 36. С. 121–130.

Особисто здобувачем виконано обробка результатів математичного моделювання розвитку та поширення пожежі у приміщеннях натурної моделі триповерхової будівлі та визначений вплив факторів статистичної похибки експерименту.

11. Гвоздь В., Некора О., Сідней С., Неділько І., Федченко С., Тищенко Є. Дослідження вогнестійкості елементів сталевих каркасів промислових будівель з урахуванням рівня механічного навантаження. *Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2021. Том 5. № 1. С. 40–49.

Особисто здобувачем розроблено математичну модель температурної й механічної реакції впливу пожежі на будівельні конструкції промислових будівель на основі методу скінченних елементів.

12. Сідней С. Розробка методики розрахунку розподілу температури у плоских залізобетонних плитах при пожежі. *Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2021. Том 5. № 2. С. 83–88.

13. Сідней С. О., Кобко В. А., Федченко С. М., Змага М. І. Удосконалення зонного методу перевірки вогнестійкості пустотної плити. *Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2022. Том 6. № 1. С. 95–103.

Особисто здобувачем розроблено математичні моделі порожнистих залізобетонних плит в умовах пожежі з метою удосконалення зонного методу оцінювання вогнестійкості таких конструкцій.

14. Рудешко І., Заїка Н., Куліца О., Сідней С. Дослідження ребристої залізобетонної панелі покриття за умовами стандартного температурного режиму пожежі. *Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та*

ліквідація». Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2022. Том 6. № 2. С. 94–101.

Особисто здобувачем розроблено теплові математичні моделі для визначення розподілу температури у залізобетонній ребристій плиті при впливі стандартного температурного режиму пожежі.

15. Поздєєв С., Березовський А., Рудешко І., Костенко Т., Сідней С. Дослідження ефективності ієрархічного підходу щодо розрахункової оцінки вогнестійкості залізобетонних балок за єврокодом 2. *Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2023. Том 7. № 1. С. 99–106.

Особисто здобувачем проведено дослідження визначення несучої здатності залізобетонної балки в умовах впливу пожежі, застосовуючи спрощену методику зонного методу.

16. Сідней С., Некора О., Рудешко І., Березовський А., Костенко Т., Іщенко І. Дослідження вогнестійкості залізобетонної ребристої плити. *Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2023. Том 7. № 2. С. 217–226.

Особисто здобувачем розроблено обчислювальні моделі для розв'язання теплотехнічної та статичної задач щодо визначення напружено-деформованого стану залізобетонної ребристої плити в умовах пожежі.

17. Сідней С. О. Дослідження впливу скінченно-елементної сітки на розподіл температури по порожнистій плиті під час моделювання пожежі. *Науковий вісник: «Цивільний захист та пожежна безпека»*. Київ. ІДУ НД ЦЗ. 2024. № 1 (17). С. 93–102.

18. Поздєєв С., Сідней С., Некора О., Рудешко І., Березовський А., Іщенко І. Дослідження вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити. *Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2024. Том 8. № 1. С. 91–100.

Особисто здобувачем проведено теплотехнічні та статичні розрахунки з метою оцінювання вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити з використанням методу скінченних елементів.

19. Сідней С. О., Тищенко О. М., Ковальов А. І., Григоренко К. В. Обґрунтування методу оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит за втратою цілісності. *Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст»*. Харків: Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. 2024. Том 6. № 187. С. 218–223.

Особисто здобувачем виконано розрахунок напружено-деформованого стану фрагменту залізобетонної порожнистої плити в умовах сумісного термосилового впливу та розроблений метод оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності.

20. Сідней С., Рудешко І., Іщенко І., Іваненко О., Степаненко В. Дослідження впливу скінченно-елементної сітки на розподіл температури по ребристій плиті при моделюванні пожежі. *Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження*

та ліквідація». Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2024. Том 8. № 2. С. 121–132.

Особисто здобувачем розроблено обчислювальна модель для розв'язання теплотехнічної задачі розподілу температури по фрагменту залізобетонної ребристої плити.

21. **Сідней С. О.** Уточнений метод оцінювання вогнестійкості ребристих плит за втратою цілісності. *Збірник наукових праць: «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. Харків: НУЦЗУ. 2024. Том 40. № 2. С. 139–153.

Статті, які додатково відображають наукові результати дисертації

22. Березовський А. І., **Сідней С. О.**, Рудешко І. В. Оцінка ефективності матеріалів для герметизації пустот будівельних конструкцій. *Збірник наукових праць: «Науковий вісник будівництва»*. Харків: ХНУБА. 2019. Том 98. №4. С. 287–294.

Особисто здобувачем проведено дослідження факторів, що впливають на поширення пожежі в будівлях.

23. Shnal T., Pozdieiev S., Nuianzin O., **Sidnei S.** Improvement of the assessment method for fire resistance of steel structures in the temperature regime of fire under realistic conditions. *Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd.* 2020. Т. 1006. Р. 107–116. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем оброблено результати математичного моделювання впливу різних температурних режимів пожежі та побудовано номограми для визначення межі вогнестійкості сталевих конструкцій при нормативних значеннях критичної температури.

24. Shnal T., Pozdieiev S., **Sidnei S.**, Shvydenko A. Determination of the Charring Rate of Timber to Estimate the Fire Resistance of Structures at Real Temperature Modes of Fires. *Proceedings of EcoComfort 2020 2nd International Scientific Conference «EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering»*. Cham: Springer. 2020. Vol. 100. Р. 409–418. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем встановлено та побудовано регресійну залежність максимальної швидкості обвуглювання та максимального часу процесу обвуглювання дерев'яних конструкцій від найбільш значущих параметрів приміщень, де виникає пожежа.

25. Поздєєв С. В., Нуянзін О. М., **Сідней С. О.**, Новгородченко А. Ю., Борсук О. В. Дослідження нагрівання сталевих двотаврових стержнів із мінераловатним вогнезахисним облицюванням в умовах стандартного температурного режиму пожежі. *Збірник наукових праць: Геотехнічна механіка*. Дніпро: Інститут геотехнічної механіки ім. Н. Полякова НАН України. 2020. № 152. С. 116–126.

Особисто здобувачем оброблено результати розподілу температури сталевих колон з вогнезахистом в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі.

26. Hvoz d V., Tishchenko E., Berezovskyi A., **Sidnei S.** Research of fire resistance of elements of steel frames of industrial buildings. *Scientific journal: «Materials Science Forum»*. Bäch: Trans Tech Publications Ltd. 2021. Vol. 1038. Р. 506–513. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем розроблено обчислювальні моделі та проведено розрахунок оцінювання вогнестійкості горизонтальних та вертикальних сталевих конструкцій за втратою несучої здатності.

27. 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. *Scientific journal «Materials Science Forum»*. Bâch: Trans Tech Publications Ltd. 2021. Vol. 1066. P. 216–223. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем встановлено залежності вогнестійкості сталезалізобетонних плит від конструктивних параметрів.

28. **Sidnei S. O.**, Nuianzin O. M., Kostenko T. V., Berezovskyi A. I., Wąsik W. A Method of Evaluating the Destruction of a Reinforced Concrete Hollow Core Slab for Ensuring Fire Resistance. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*. Sumy: Sumy State University. 2023. Vol. 10. №2. P. D1–D7. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем розроблено обчислювальну модель напружено-деформованого стану порожнистої плити в умовах пожежі, а також методiku розрахунку її руйнування в цих умовах.

Монографія

29. Поздєєв С. В., **Сідней С. О.**, Гвоздь В. М., Тищенко О. М., Нуянзін О. М., Некора О. В., Шналь Т. М., Березовський А. І., Рудешко І. В., Федченко С. М., Неділько І. А.. Достовірність результатів вогневих випробувань при оцінюванні межі вогнестійкості несучих стін. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2021. 100 с.

Особисто здобувачем розроблено математичні моделі та проведено обчислювальні експерименти щодо визначення вогнестійкості несучих стін.

Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації

30. Нуянзін О. М., **Сідней С. О.**, Поздєєв С. В. Обчислювальний експеримент по дослідженню рівномірності прогріву несучої залізобетонної стіни при її випробуваннях на вогнестійкість. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації: матеріали*. Львів: ЛДУ БЖД. 2016. С. 511–512. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем проведено обчислювальні експерименти дослідження рівномірності прогріву несучої залізобетонної стіни при її випробуваннях на вогнестійкість.

31. Болжаларський К. В., Кришталь М. А., Нуянзін О. М., **Сідней С. О.** Дослідження рівномірності прогріву несучої стіни при її випробуваннях на вогнестійкість. *Матеріали 18 Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників*. Київ: ІДУ НД ЦЗ. 2017. С. 55–56. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем проведено обчислювальні експерименти дослідження рівномірності прогріву несучої залізобетонної стіни при її випробуваннях на вогнестійкість.

32. Нуянзін О. М., Поздєєв С. В., **Сідней С. О.**, Некора О. В. Математичне моделювання процесу тепломасообміну у камерах вогневих печей установок для випробувань на вогнестійкість несучих стін. *Комплексне забезпечення якості*

технологічних процесів та систем: збірник VII-ї Міжнародної науково-практичної конференції. Чернігів: ЧНТУ. 2017. С. 117–118. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем розроблено математичні моделі для визначення конфігурації вертикальної випробувальної печі з найбільш рівномірним розподілом температур.

33. Pozdieiev S., Nuianzin O., **Sidnei S.** Bearing walls fire resistance tests efficiency computational study using different configurations of combustion furnaces. In XVIII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering, production engineering and physics». Series: Monografie №6. Czestochowa. 2017. P. 439–444. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем розроблено математичні моделі для визначення конфігурації вертикальної випробувальної печі з найбільш рівномірним розподілом температур.

34. Нуянзін О. М., **Сідней С. О.**, Медвідь Б. А. Моделювання процесів нестационарного теплообміну при випробуваннях залізобетонних конструкцій на вогнестійкість. Збірник VI міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті». Харків: НУЦЗУ. 2017. С. 142–143. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем виконано моделювання процесів нестационарного теплообміну при випробуваннях залізобетонних конструкцій на вогнестійкість.

35. Нуянзін О. М., **Сідней С. О.**, Березовський О. І. Дослідження впливу дизайну камер вогневих печей на адекватність результатів випробувань стін на вогнестійкість. Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2017. С. 222–223. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем проведено дослідження впливу конструктивних параметрів камер вогневих печей на адекватність результатів випробувань стін на вогнестійкість.

36. Pozdieiev S., Nuianzin O., **Sidnei S.**, Shchipets S. Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces configurations. MATEC Web of Conferences Volume 116, 2017. 6th International Scientific Conference “Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings” (Transbud-2017). Kharkiv: USURT. 2017. P. 02027. (Форма участі – заочна). (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем проведено дослідження впливу конструктивних параметрів камер вогневих печей на адекватність результатів випробувань стін на вогнестійкість.

37. Кударенко К. С., Горобець В. О., Поздєєв С. В., **Сідней С. О.** Розрахунок оцінки пожежної небезпеки у внутрішньому просторі електричної шафи запорізької атомної електричної станції. Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів і студентів «Пожежна та техногенна безпека: наука і практика», Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2018. С. 31–34. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем проведено дослідження щодо настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності електричної шафи запорізької атомної електричної станції в умовах пожежі.

38. **Сідней С. О.**, Кударенко К. С. Перевірка впливу вимірювальних приладів на адекватність результатів випробувань на вогнестійкість вертикальних конструкцій. *Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності»*. Львів: ЛДУ БЖД. 2018. С. 134–135. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем проведено дослідження щодо перевірки впливу вимірювальних приладів на адекватність результатів випробувань на вогнестійкість вертикальних конструкцій.

39. Pozdieiev S., Nekora O., Kryshthal T., Zazhoma V. and **Sidnei S.** Method of the calculated estimation of the possibility of progressive destruction of buildings in result of fire. *MATEC Web Conf.* Kharkiv: USURT. 2018. 02026. (Форма участі – заочна). (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем взято участь в розробці математичної моделі прогнозування прогресуючого руйнування в будівлях із залізобетонними конструкціями.

40. Pozdieiev S., Pidgoretskiy Y., Nekora O., **Sidnei S.**, Tyshchenko O. Research of Explode Exposure at the Relief Vent System Structures with Soft Transparent Material. *Conference Transport Technologies and Infrastructure Special*. Kharkiv: USURT. 2018. Vol. 7. № 4.3. P. 298–302. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем взято участь в розробці методики дослідження впливу конструктивних параметрів гнучких елементів огорожі в умовах вибуху.

41. Pozdieiev S., Nekora O., Kryshthal T., **Sidnei S.** and Shvydenko A. Improvement of the estimation method of the possibility of progressive destruction of buildings caused by fire. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Kharkiv: USURT. 2019. Vol. 708. P. 012067. (Форма участі – заочна). (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем взято участь в розробці математичної моделі прогресуючого руйнування для каркасів будівель.

42. **Сідней С.**, Ткаченко Є. Визначення залежності між значенням межі вогнестійкості вертикальних залізобетонних будівельних конструкцій і дисперсією температур на їх обігрівальних поверхнях. *Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2020. С. 207–208. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем проведено дослідження з виявлення впливу залежності між значенням межі вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій і дисперсією температур на їх обігрівальних поверхнях.

43. **Сідней С. О.**, Ткаченко Є. Г., Горбач Г. І., Сідней А. С. Визначення впливу вимірювальних приладів на достовірність результатів випробувань на вогнестійкість вертикальних конструкцій. *Матеріали X Всеукраїнської науково-практичної*

конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2020. С. 215–217. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем визначено вплив вимірювальних приладів на достовірність результатів випробувань на вогнестійкість вертикальних конструкцій.

44. Шналь Т. М., Поздєєв С. В., Нуянзін О. М., **Сідней С. О.** Удосконалення методу оцінки вогнестійкості сталевих конструкцій в умовах температурного режиму пожежі, наближеного до реального. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. Харків: НУЦЗУ. 2020. С. 194–195. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем взято участь в розробці скінченно-елементної моделі для проведення досліджень впливу пожежі на сталеві конструкції.

45. Zmaha M. I., Pozdieiev S. V., Zmaha Y. V., Nekora O. V. and **Sidnei S. O.** Research of the behavioral of the wooden beams with fire protection lining under fire loading. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2021)*. Kharkiv: USURT. 2021. Vol. 1021. P. 012031. (Видання включено до наукометричної бази Scopus). (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем взято участь в розробці методики експериментальних досліджень поведінки дерев'яної балки із вогнезахистом в умовах впливу пожежі.

46. **Сідней С. О.**, Несен І. С., Ромененко А. О., Сідней А. С. Дослідження впливу на показники значення межі вогнестійкості вертикальних залізобетонних будівельних конструкцій від дисперсії температур на їх обігрівальних поверхнях. *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2021. С. 58–59. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем розроблено обчислювальну модель для проведення досліджень впливу на показники значення межі вогнестійкості будівельних конструкцій від дисперсії температур.

47. Данкевич І., Канюк В., Неділько І., Сідней А., Лозумирська А., Трошкін С., Сопільник В., **Сідней С.** Дослідження прогріву залізобетонної плити в умовах стандартного температурного режиму пожежі. *Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2021. С. 23–24. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем розроблено обчислювальну модель для проведення досліджень розподілу температури в залізобетонній плиті плит перекриттів за допомогою методу скінченних елементів.

48. Гвоздь В., Тищенко О., Поздєєв С., Шналь Т., Луб'яний А., **Сідней С.** Оцінка вогнестійкості залізобетонних плит перекриттів за умов стандартного температурного режиму пожежі. *Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2021. С. 88–90. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем проведено оцінювання вогнестійкості залізобетонних плит в умовах пожежі.

49. Nuianzin O., **Sidnei S.**, Zayika P., Fedchenko S., Alimov B. Determining the Dependence of Fire Parameters in a Cable Tunnel on its Characteristics. *Materials Science and Engineering*. Bristol: IOP Publishing Ltd. 2021. Vol. 1021. № 1. P. 012023. (Форма участі – заочна). (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем взято участь у розробці методики проведення повнофакторного експерименту з вивчення впливу пожежі в кабельних тунелях.

50. Некора В. С., **Сідней С. О.**, Шналь Т. М., Некора О. В. Поведінка сталезалізобетонної плити при пожежі. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. Харків: НУЦЗУ. 2022. С. 34–35. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем взято участь в розробці обчислювальних моделей розподілу температури по сталезалізобетонній плиті в умовах пожежі.

51. Поздєєв С. В., Несен І. С., **Сідней С. О.** Оцінка вогнестійкості залізобетонного маршу сходової клітини. *Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення»*. Львів: ЛДУ БЖД. 2022. С. 132–134. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем взято участь в розробці методики проведення експериментальних досліджень оцінювання межі вогнестійкості залізобетонного сходового маршу.

52. Поздєєв С. В., Березовський А. І., Неділько І. А., **Сідней С. О.** Обґрунтування спрощеного розрахункового методу оцінки вогнестійкості залізобетонної пустотної плити. *Матеріали IX Міжнародної конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки»*. Одеса: ОДАБА. 2022. С. 155–157. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем розроблено спрощений розрахунковий метод оцінювання вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити.

53. **Sidnei S.**, Shnal T., Kholod P., Pozdieiev S. Forecasting the Behavior of Steel Beams with Corrugated Walls Under the Thermal Exposure of a Fire. In: Blikharsky, Z. (eds) *Proceedings of EcoComfort 2022. EcoComfort 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer, Cham. 2022. Vol 290. P. 388–398. (Форма участі – заочна). (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем розроблено скінченно-елементну модель для дослідження розподілу температури у сталевій балці.

54. Банщиків С. О., **Сідней С. О.**, Рудешко І. В. Дослідження розподілу температури по залізобетонній колоні при впливі стандартного температурного режиму пожежі. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених: «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту»*. Харків: НУЦЗУ. 2023. С. 12. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем проведено дослідження розподілу температури в залізобетонній колоні в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі.

55. **Сідней С. О.**, Березовський А. І., Касярум С. О., Частоколенко І. П. Дослідження поведінки залізобетонної ребристої плити в умовах пожежі. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. Харків: НУЦЗУ. 2023. С. 147–148. (Форма участі – очна).

Особисто здобувачем проведено обчислювальні експерименти з оцінювання вогнестійкості залізобетонної ребристої плити за допомогою методу скінченних елементів.

56. Vranay F., Zelenakova M., Nekora O., **Sidnei S.** Determination of temperature distribution in a ribbed reinforced concrete slab under the thermal influence of fire. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2023. С. 100–102. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем розроблено обчислювальну модель та проведено розрахунок розподілу температури в залізобетонній ребристій плиті в умовах пожежі.

57. Pozdieiev S., **Sidnei S.**, Hvoz V., Tyshchenko O., Shnal T. Study of fire resistance of reinforced concrete slabs under thermal influence based on the use of the parametric temperature fire modes. *Proceedings of the 9th International scientific conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structure and Buildings» (TransBud 2021)*. Kharkiv. 2023. Vol. 2684. № 1. P. 030035-1-030035-8. (Форма участі – заочна). (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем розроблено скінченно-елементну модель для оцінювання вогнестійкості залізобетонних плит в умовах впливу параметричних температурних режимів пожежі.

58. **Sidnei S.**, Berezovskyi A., Nedilko I., Pozdieiev S. The improvement of the simplified calculation method for assessing the fire resistance of a hollow-core slab. *AIP Conf. Proc.* 2023. Vol. 2840. №1. P. 040004. (Форма участі – заочна). (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем розроблено математичну модель на основі методу скінченних елементів для оцінювання вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити.

59. Pozdieiev S., **Sidnei S.**, Nekora O., Subota A., Kulitsa, O. Study of the Destruction Mechanism of Reinforced Concrete Hollow Slabs Under Fire Conditions. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Kharkiv. 2023. P. 447–457. (Видання включено до наукометричної бази Scopus). (Форма участі – очна).

Особисто здобувачем проведено дослідження механізму руйнування залізобетонної порожнистої плити в умовах пожежі.

60. Зуєнко М., Брусліновська П., Самойленко М., Сулейманов А., **Сідней С.** Дослідження залізобетонної ребристої плити під час оцінювання вогнестійкості за втратою несучої здатності. *XIX Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності»*. Львів: ЛДУ БЖД. 2024. С. 161–164. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем проведено дослідження напружено-деформованого стану залізобетонної ребристої плити при оцінюванні вогнестійкості за втратою несучої здатності.

61. **Сідней С. О.**, Березовський А. І., Рудешко І. В., Іщенко І. І. Дослідження вогнестійкості порожнистої плити при пожежі за допомогою математичного моделювання. *X Міжнародна конференція «Актуальні проблеми інженерної механіки»*. Одеса. 2024. (Форма участі – очна).

Особисто здобувачем розроблено математичну модель на основі методу скінченних елементів, та проведено розрахунок оцінювання вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити.

62. Поздєєв С., **Сідней С.**, Некора О., Рудешко І., Березовський А., Іщенко І. Дослідження настання граничних станів з вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2024. С. 254–255. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем розроблено математичну модель на основі методу скінченних елементів, та проведено розрахунок оцінювання вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити.

63. **Сідней С.**, Рудешко І., Романенко Д., Зуєнко М. Дослідження закономірності впливу навантаження на вогнестійкість ребристій залізобетонній плиті. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2024. С. 134–136. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем розроблено математичну модель на основі методу скінченних елементів та проведено оцінювання вогнестійкості залізобетонної ребристої плити.

64. **Сідней С.**, Тейзе А., Рудешко І. Дослідження втрати несучої здатності залізобетонної ребристої плити під час впливу пожежі. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2024. С. 136–138. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем розроблено математичну модель на основі методу скінченних елементів та проведено оцінювання вогнестійкості залізобетонної ребристої плити.

65. **Сідней С.** Вплив скінченно-елементної сітки на розподіл температур у плиті при пожежі. *XXIII Наукова конференція «Наукові підсумки 2024 року»*. Збірка наукових тез. Харків: Технологічний центр. 2024. С. 31. (Форма участі – заочна).

АНОТАЦІЯ

Сідней С. О. Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкцій за втратою цілісності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека. Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, 2025.

Дисертаційна робота присвячена розв’язанню актуальної наукової проблеми у сфері пожежної безпеки та полягає у розкритті закономірностей утворення магістральних тріщин у горизонтальних огорожувальних залізобетонних конструкціях, зокрема у порожнистих та ребристих плитах в умовах впливу пожежі. Робота охоплює виявлення закономірностей утворення даних тріщин у залежності від конструктивних параметрів таких конструкцій; розробку системи критеріїв для фіксування граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності за результатами розрахунків; використання експериментальних та обчислювальних досліджень поведінки залізобетонних порожнистих та ребристих плит. Науковою основою дослідження є розроблена ієрархічна система методів розрахункового оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності для таких конструкцій. Ця система дозволяє забезпечити виконання вимог нормативного законодавства в частині забезпечення вогнестійкості будівель та споруд та сприяє підвищенню пожежної безпеки будівельних об’єктів завдяки точнішому оцінюванню вогнестійкості залізобетонних плит. Це дозволяє зменшити ризики поширення вогню, створити умови для безпечної евакуації людей під час пожежі, а також сприятиме ефективній роботі рятувальних підрозділів у процесі її гасіння. Отримані результати можуть стати основою для удосконалення нормативної бази у сфері проєктування вогнестійких конструкцій, що сприятиме підвищенню безпеки будівельних об’єктів та ефективності їх експлуатації.

Ключові слова: вогнестійкість, цілісність, тріщини, залізобетонні плити, математичне моделювання пожежі, вогневі випробування, повнофакторний експеримент, метод скінченних елементів.

ABSTRACT

Sidnei S. O. Development of scientific foundations for assessing the fire resistance of horizontal enclosing reinforced concrete structures by loss of integrity. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 21.06.02 – fire safety. National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, 2025.

The dissertation is dedicated to solving a pressing scientific problem in the field of fire safety, which involves revealing the patterns of main crack formation under fire exposure in horizontal enclosing structures, specifically hollow and ribbed slabs. This, in turn, has provided the foundation for developing a hierarchical system of methods for computational assessment of fire resistance based on the attainment of the ultimate state due

to the loss of integrity for such structures. The goal is to ensure compliance with regulatory fire resistance requirements for buildings and structures, thereby enhancing fire safety by preventing the penetration of hazardous fire factors due to the loss of integrity of reinforced concrete slabs during fire exposure for the standardized fire duration.

In the second chapter, a methodology and a mathematical model were developed for simulating the behavior of hollow reinforced concrete slabs under fire conditions using the explicit method of integrating the stress-strain state equations.

Based on the results of the calculations, data were obtained that allow predicting the formation and development of through-cracks in such structures. The peculiarities of their formation mechanism were identified, namely, the occurrence of transverse cracks due to the formation of a failure prism with an apex angle of approximately 61° . This became the basis for developing an appropriate mathematical model that enables the prediction of transverse crack development and through-type defects, as well as determining the moment of reaching the ultimate state based on the loss of integrity.

In the third chapter, studies were conducted on the behavior of a reinforced concrete hollow slab under fire test conditions to verify the developed mathematical model. The assessment of the adequacy of the mathematical modeling of reinforced concrete slab behavior using Fisher's criterion under the finite element method showed that the obtained results are reliable, as the calculated Fisher's criterion values do not exceed the corresponding tabulated values. This proves the effectiveness of the specified method in determining fire resistance limits based on ultimate states characterized by the loss of thermal insulation capacity, load-bearing capacity, and integrity.

In the fourth chapter, an improved method for assessing the fire resistance of a reinforced concrete hollow slab was developed. Unlike existing methods, it allows for considering the occurrence of the ultimate state in terms of fire resistance due to integrity loss by visually analyzing fully destroyed finite elements in the concrete. This enables verifying the condition for the appearance of through-cracks and/or defects leading to this ultimate state.

Additionally, during the research process, mathematical models were developed to define criteria that allow predicting the formation of through transverse and longitudinal cracks and defects in reinforced concrete hollow slabs. These models indicate the onset of the fire resistance ultimate state due to integrity loss in such structures under fire conditions. This became the prerequisite for developing a simplified method for assessing the fire resistance of hollow reinforced concrete slabs based on integrity loss.

In the fifth chapter, mathematical modeling of the behavior of ribbed reinforced concrete slabs under fire exposure was conducted. This made it possible to develop a refined method for assessing the fire resistance of ribbed reinforced concrete slabs, particularly in cases of integrity loss due to panel failure in the cells between the longitudinal and transverse ribs of the slab.

Additionally, this chapter presents a simplified method for calculating the fire resistance of ribbed slabs based on the criterion of integrity loss. It is based on a developed mathematical model that defines the criterion for the formation of through-cracks in the cells between the ribs.

In the sixth chapter, based on the identified patterns of the onset of the fire resistance limit due to integrity loss, a regression dependency was established for horizontal enclosing reinforced concrete structures, describing the change in fire resistance limits depending on the structural parameters of the constructions.

As a result of the research presented in this chapter, a tabular method for assessing the fire resistance of hollow and ribbed reinforced concrete slabs under the ultimate state of integrity loss was developed. This method, based on the structural parameters of the slabs, allowed for the creation of a hierarchical system of computational assessment methods for hollow and ribbed reinforced concrete slabs under the ultimate state of integrity loss.

In the seventh chapter, algorithms for the refined and simplified methods of fire resistance assessment for such structures under the ultimate state of integrity loss were developed.

The proposed hierarchical system ensures compliance with regulatory requirements and improves the accuracy of fire resistance assessment:

- by 12% for hollow slabs compared to fire test results;
- by 16.1% for ribbed slabs compared to mathematical modeling results.

The developed system facilitates the detection of through-defects before the loss of load-bearing capacity, allowing for a more accurate assessment of the risks associated with integrity loss during a fire. This, in turn, enhances the level of fire safety in buildings, enabling the timely implementation of preventive measures.

Keywords: fire resistance, integrity, cracks, reinforced concrete slabs, mathematical fire modeling, fire tests, full-factorial experiment, finite element method.