

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Федченко Світлана Миколаївна

УДК 614.841.45


ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ НА
ВОГНЕСТІЙКІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ТА РИГЕЛІВ**

Спеціальність – 261 Пожежна безпека
Галузь знань – 26 Цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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


С. М. Федченко

Науковий керівник: **Поздєєв Сергій Валерійович**
доктор технічних наук, професор

Черкаси – 2023

АНОТАЦІЯ

Федченко С. М. Удосконалення методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 «Пожежна безпека». – Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, Черкаси, 2023.

Зміст анотації.

Актуальність теми дослідження. Обґрунтування вибору теми продиктоване тим, що в процесі прогнозування поведінки залізобетонних будівельних конструкцій в умовах пожежі вагоме місце займає прогнозування вогнестійкості залізобетонних балок та ригелів, оскільки їхнє руйнування та обвалення становить найбільшу небезпеку для життя людей, які перебувають у будівлях, та аварійно-рятувальних підрозділів, які ліквідовують наслідки надзвичайних ситуацій.

Одним з основних способів підвищення надійності будівель в умовах пожежі є забезпечення нормованої межі вогнестійкості залізобетонних балок та ригелів, а найбільш ефективним підходом щодо прогнозування вогнестійкості залізобетонних конструкцій є розрахунковий, що заснований на математичних моделях розрахункових методів. Передумовою для застосування цього підходу є вивчення закономірностей температурних розподілів у перерізах залізобетонних ригелів та балок під час вогневих випробувань та закономірності зниження міцності бетону від температури, що є частиною початкових даних для вирішення задач міцності для розрахункової прогнозованої оцінки вогнестійкості залізобетонних ригелів та балок під час пожежі.

Ідея роботи полягає у забезпеченні нормативного значення класу вогнестійкості залізобетонних балок та ригелів для підвищення надійності будівель на основі прогнозування вогнестійкості за методом ідентифікації

залежності коефіцієнта зниження міцності бетону від температури. Для реалізації даного методу запропоновано в якості даних, що входять у набір результатів вимірювань під час здійснення вогневих випробувань, використовувати аналогічні дані, отримані за допомогою математичного моделювання на основі методу скінчених елементів та заданих властивостей матеріалів враховуючи рекомендації настанов кривої зниження міцності бетону залежно від температури. Такими даними є залежності від часу температурних показників в окремих точках перерізу та залежність максимального прогину ригеля від часу в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Мета роботи полягає у розкритті закономірностей зміни розподілень температури та міцності бетону у перерізах залізобетонних ригелів та балок залежно від тривалості теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі як наукового підґрунтя удосконалення методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних ригелів та балок.

Основні завдання дослідження:

1. Виконати аналіз сучасного стану щодо нормування та методів оцінювання вогнестійкості залізобетонних ригелів та балок в Україні і шляхів удосконалення методів, що базуються на розрахунковому підході.

2. Розробити метод інтерполяції температурних розподілень у перерізі залізобетонних ригелів та балок за точковими вимірювання температури під час вогневих випробувань та на його основі розробити метод ідентифікації коефіцієнтів зниження міцності бетону таких залізобетонних ригелів.

3. Обґрунтувати методику та провести з її використанням випробування залізобетонних балок та ригелів, на основі яких виконати інтерполяцію температурних розподілень.

4. За визначеними температурними розподіленнями виконати ідентифікацію коефіцієнтів зниження міцності бетону залізобетонного ригеля, до якого були застосовані вогневі випробування.

5. Дослідити адекватність результатів, отриманих за запропонованим методом ідентифікації коефіцієнтів зниження міцності бетону за даними вимірювань, що отримані у результаті вогневих випробувань залізобетонних ригелів, і визначити умови, за яких досягається їхня найбільша точність.

6. Розробити удосконалений метод розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів, для яких отримані дані щодо зниження міцності бетону є частиною комплексу початкових даних.

Об'єкт дослідження – процеси нагрівання, деформування та руйнування, пов'язані з настанням граничних станів вогнестійкості, що відбуваються у залізобетонних ригелях та балках в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Предмет дослідження – закономірності змінення температурних розподілень у перерізах та зниження міцності бетону залізобетонних ригелів та балок залежно від їхніх конструктивних параметрів та тривалості теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Наукова новизна дисертації полягає у розкритті закономірностей зміни розподілень температури та міцності бетону в перерізах залізобетонних балок та ригелів залежно від тривалості теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі. При цьому:

1. Вперше виявлені закономірності залежностей параметрів інтерполяційних функціоналів, які описують температурний розподіл у перерізі залізобетонних балок та ригелів, від часу випробувань за умов високих температур для прогнозування міцнісної деградації бетону та арматурної сталі ригелів та балок.

2. Вперше запропонований метод ідентифікації залежності коефіцієнту зниження міцності бетону від температури, заснований на інтерполяції температурних розподілень у перерізах залізобетонних ригелів під час їхніх вогневих випробувань за точковими температурними

вимірюваннями у шарах бетону та деформаційній математичній моделі напружено-деформованого стану ригелів в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі.

3. Вперше виявлена закономірність температурної залежності коефіцієнта зниження міцності бетону для залізобетонних балок та ригелів в умовах їхніх вогневих випробувань з використанням запропонованого методу її ідентифікації, яка може бути описана регресійною залежністю:

$$k_c(\theta) = 1 + 1.505 \cdot 10^{-3} \theta - 7.123 \cdot 10^{-6} \theta^2 + 6.655 \cdot 10^{-9} \theta^3 - 1.921 \cdot 10^{12} \theta^4.$$

4. Удосконалено метод розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі у результаті використання отриманої температурної залежності коефіцієнта зниження міцності бетону як частини початкових даних для визначення часу настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності на основі розв'язання задачі міцності за деформаційною математичною моделлю.

5. Набула подальшого розвитку сфера застосування удосконаленого методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій і науково обґрунтовано можливість його застосування для оцінки вогнестійкості залізобетонних балок та ригелів в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі, який дозволяє більш точно визначити клас вогнестійкості будівельної конструкції на основі визначення фактичної межі вогнестійкості.

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність дисертаційних досліджень полягає у розробленні удосконаленого методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів. Застосування запропонованого методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів дозволить суттєво підвищити точність прогнозування даних під час аналізу відповідності залізобетонних балок та ригелів вимогам норм щодо їхньої вогнестійкості, чим дозволить підвищити рівень пожежної безпеки будівель із залізобетонними

конструкціями. З огляду на вищевикладене, розроблений метод можливо використовувати в процесі розроблення відповідної нормативної документації для прогнозування роботи залізобетонних балок та ригелів в умовах пожежі.

Результати дослідження впроваджені у діяльність Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту під час виконання науково-дослідних робіт, розробки нормативно-правових актів (акт про впровадження результатів дисертаційної роботи від 21 липня 2023 року) та у діяльність Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям Державної служби України з надзвичайних ситуацій, шляхом апробації та практичного застосування удосконаленого методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів (акт впровадження результатів дисертаційної роботи від 3 жовтня 2023 року), а також в освітній процес Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України при підготовці фахівців освітнього рівня «бакалавр» на кафедрі безпеки об'єктів будівництва та охорони праці за спеціальностями 261 «Пожежна безпека» та 263 «Цивільна безпека» (акт про впровадження результатів дисертаційної роботи від 29 серпня 2023р.).

Методи дослідження. Для дослідження залізобетонних балок та ригелів застосовувався експериментальний метод випробувань в умовах дії високих температур. При встановленні основних закономірностей для температурних розподілень, міцності бетону та параметрів напружено-деформованого стану у перерізах залізобетонних балок та ригелів використаний метод математичного моделювання. В процесі розроблення методики розрахункової інтерпретації результатів експериментів застосовані спрощені стандартні методи моделювання поведінки залізобетонних балок та ригелів в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі. Для вивчення достовірності та адекватності результатів експериментів і моделювання теплових процесів у перерізі залізобетонних балок та ригелів в умовах теплового впливу

стандартного температурного режиму пожежі застосовані методи математичної статистики.

У **вступі** наведено загальну характеристику дисертації, обґрунтовано актуальність теми досліджень, сформульовано мету, завдання, визначено об'єкт та предмет дослідження, вказано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, розкрито зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, визначено особистий внесок здобувача, наведено дані про апробацію, публікації, структуру та обсяг роботи.

У **першому розділі** проаналізовано основні методи прогнозування поведінки залізобетонних балок та ригелів під час впливу високих температур, а також описано методики їхнього проведення. Обґрунтовано недоліки та переваги кожного методу прогнозування поведінки залізобетонних конструкцій у випадку теплового та механічного навантаження. Розкрито закономірності зміни міцності бетону та арматурної сталі за різних температур нагрівання.

На основі результатів виконаного аналізу сформульовано мету та основні завдання роботи.

У **другому розділі** описано математичну модель залізобетонної балки та виконано математичне моделювання напружено-деформованого стану у перерізі залізобетонної балки в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі. Після розв'язання теплових задач отримано дані про температурні розподілення та параметри напружено-деформованого стану залізобетонної балки та ригеля за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі. Запропоновано та обґрунтовано метод ідентифікації залежності від температури коефіцієнта зниження міцності бетону залізобетонних ригелів та балок прямокутного перерізу, а також показано, що результати, отримані за допомогою методу ідентифікації коефіцієнта зниження міцності бетону, є адекватними, оскільки їхня відносна похибка у середньому не перевищує 6,4 %, і можуть бути застосованими для аналізу термомеханічних властивостей бетону

залізобетонних ригелів та балок для удосконаленого методу розрахунку на вогнестійкість.

Третій розділ присвячено опису експериментального обладнання для вогневих випробувань залізобетонних ригелів в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі і методикам експериментального дослідження міцності бетону залізобетонних ригелів. В цьому розділі описано склад суміші та методику виготовлення зразків, запропоновано схему розташування термопар. Основне експериментальне обладнання – установка, що складається з вогневої печі з паливно-форсуновою системою на дизельному паливі. Експеримент виконано протягом контрольного часу, який відповідає часу настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності для залізобетонних ригелів та балок.

У **четвертому розділі** представлено результати експериментальних досліджень. Вони показали, що залізобетонні ригелі мають час настання граничного стану за втратою несучої здатності більший за 60 хв, а виконана інтерполяція температурного розподілу за результатами експерименту за розробленою методикою підтвердила, що обраний алгоритм є стійким і дає адекватні результати. Також було отримано уточнену залежність від температури коефіцієнта зниження міцності бетону для залізобетонних ригелів та балок, що дозволяє підвищити точність методу розрахунку на вогнестійкість для елементів конструкцій такого типу на 8 %. Для аналітичного описання отриманої закономірності зниження міцності бетону залізобетонного ригеля, підданого випробуванню, був здійснений регресійний аналіз. У результаті виконаного регресійного аналізу було отримано рівняння регресії, що описує отриману закономірність зниження міцності бетону залежно від температури, що має такий вигляд:

$$k_c(\theta) = 1 + 1.505 \cdot 10^{-3} \theta - 7.123 \cdot 10^{-6} \theta^2 + 6.655 \cdot 10^{-9} \theta^3 - 1.921 \cdot 10^{-12} \theta^4.$$

У п'ятому розділі виконані розрахунки граничного максимального прогину залізобетонних ригелів та балок. На основі отриманих результатів були побудовані графіки зниження несучої здатності цих елементів. Також, за допомогою критерію Фішера було проаналізовано адекватність результатів розрахунків, що не перевищує табличного значення та дорівнює 0,97. Отримані результати за запропонованим методом є достатньо точними, оскільки розбіжність з теоретичними та експериментальними даними у середньому становлять 10,9 %.

Ключові слова: залізобетонний ригель, залізобетонна балка, процеси горіння, вогнестійкість, тепловий потік, вплив вогню, стандартний температурний режим, пожежна безпека, комп'ютерне моделювання, коефіцієнт зниження міцності бетону, математична модель, розрахунковий метод.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Федченко С. М. Дослідження зниження міцності бетону залізобетонного ригеля в умовах вогневих випробувань. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. 2023. Т. 6. № 180. С. 176-186.

<https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6208/6127>

2. Федченко С. Обґрунтування методу ідентифікації механічних характеристик бетону залізобетонних ригелів за результатами вогневих випробувань. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: зб. наук. праць*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2023. Т. 7. № 1. С. 149-157. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.1.149.157>

3. Сідней С., Кобко В., Федченко С., Змага М., Заїка Н. Удосконалення зонного методу перевірки вогнестійкості пустотної плити. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: зб. наук. праць*.

Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2022. Т. 6. № 1. С. 95–103. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.1.95-102>

4. Гвоздь В., Некора О., Сідней С., Неділько І., Федченко С., Тищенко Є. Дослідження вогнестійкості елементів сталевих каркасів промислових будівель з врахуванням рівня механічного навантаження. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: зб. наук. праць*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2021. Т. 5. № 1. С. 40–49. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524-2636.2021.5.1.-40-49>

5. Kovalyshyn V., Pozdieiev S., Fedchenko S. Concrete walls conduct under the fire influence investigation using final elements method. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: зб. наук. праць*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. Т. 4. 2018. С. 89–98. URI: <https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/issue/view/4>

Стаття в періодичному науковому виданні іншої держави

6. Pozdieiev S., Nekora O., Fedchenko S., Shnal T. Method of Identification of Mechanical Characteristics of Concrete of Reinforced Concrete Crossbars according to the Results of Fire Tests *Construction Technologies and Architecture*. Trans Tech Publications Ltd. 2023. С. 9 P. 59 - 66. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-kev0Ho>

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

7. Pozdieiev S., Nekora O., Fedchenko S., Zaika N., Shnal T., Subota A., Nesukh M. Method for identifying the strength characteristics of concrete of a reinforced concrete crossbar during heating under conditions of fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. №3 (7(123)). 2023. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.282205>

8. Pozdieiev S., Shnal T., Kholod P., Fedchenko S., Nedilko I. Evaluation of fire resistance of reinforced concrete beams on the basis of use of parametric temperature curves of fire modes. *AIP conference proceedings «Reliability and durability of railway transport engineering structure and buildings»*.

Kharkiv:Ukrainian state university of railway transport. AIP 2684. 030034 (31.05.2023). DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0120002>

Монографія

9. 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. *Монографія*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2021. С. 100.

Список публікацій, які засвідчують апробацію дисертації

10. Нуянзін О. М., Поздєєв С. В., Неділько І. А., Федченко С. М., Борсук О. В. Визначення стану втрати вогнестійкості сталевих балок з вогнезахисним мінераловатним облицюванням. *X Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*: тези доповідей (Черкаси, 29-30 жовтня 2020 р.). Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2020. С. 120-121. <https://chipb.dsns.gov.ua/upload/1/2/2/8/5/2/9/2020-10-29-zbirnik-nsbz-2020.pdf>

11. Поздєєв С. В., Федченко С. М., Неділько І. А., Данкевич І., Канюк В. Вогнестійкість залізобетонних балок в умовах впливу параметричних температурних режимів пожежі. *XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*: тези доповідей (Черкаси, 28-29 жовтня 2021 р.). Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2021. С. 179-180. <https://chipb.dsns.gov.ua/upload/1/2/2/8/5/2/3/2021-10-26-nadzvicaini-situaciyi-zbirnik-tez-konferenciyi-2021.pdf>

12. Поздєєв С. В., Шналь Т. М., Холод П. Ф., Федченко С. М., Неділько І. А. Оцінка вогнестійкості залізобетонних балок на основі використання параметричних температурних кривих режимів пожежі. *IX Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та*

довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті»: тези доповідей (Харків 17-18 листопада 2021 р.). Харків: УкрДУЗТ. 2021. С. 160-161.

http://conf.kart.edu.ua/images/stories/konf-1/pdf/Theses_2021_10.12.pdf

13. Поздєєв С. В., Федченко С. М., Неділько І. А., Заїка Н. П., Сідней А. С. Дослідження розподілу температури у сталі залізобетонних плитах при пожежі. *XIII Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*: тези доповідей (Черкаси, 26 квітня 2022 р.). Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2022 С. 179-180.

<https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2022/6.pdf>.

14. Федченко С. М., Некора В. С., Сідней А. С., Поздєєв С. В. Дослідження залежності показників вогнестійкості сталевих елементів від рівня механічного навантаження. *Всеукраїнська науково-практична конференція курсантів, студентів, ад'юнктів (аспірантів) «Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених»*: тези доповідей (Черкаси, 26 травня 2022 р.). Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. С.66-68. https://chipb.net.ua/library/nauk_zbirnyk/

15. Поздєєв С. В., Некора О. В., Федченко С. М. Оцінка вогнестійкості залізобетонного ригеля. *Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення»*: тези доповідей (м. Львів, 12-13 жовтня 2022 р.). Львів: ЛДУБЖД. 2022. С.135-138 URI:

<https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/11068>

16. Pozdieiev S., Fedchenko S., Kapalo P. Assessment of the fire resistance of reinforced concrete crossbar. *XII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*: тези доповідей (Черкаси, 27 – 28 жовтня 2022 р.). Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2022. С. 77-78.

<https://chipb.dsns.gov.ua/upload/1/5/1/1/8/0/1/gTG4Mzjniuitb9Waoili99FDDQUI4FF3CEp78K5A.pdf>

17. Федченко С. М., Поздєєв С. В. Уточнення коефіцієнта зниження міцності бетону залізобетонних ригелів за результатами вогневих випробувань. *Міжнародна науково - практична конференція молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту»*: тези доповідей (Харків, 20 – 21 квітня 2023 р.). Харків: НУЦЗ України. 2023 р. С.116. https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2023/Problemy_ta_perspektyvy.pdf

18. Поздєєв С. В., Некора О. В., Федченко С. М., Шналь Т. М. Метод ідентифікації механічних характеристик бетону залізобетонних ригелів за результатами вогневих випробувань. *Міжнародної науково-практичної конференції «Problems of Emergency Situations»*: тези доповідей (Харків , 19 травня 2023 р.). Харків: НУЦЗ України. 2023 р. С. 110-111.
http://pesconf.nuczu.edu.ua/images/2022/Program_PES2023_130523_c.pdf

ANNOTATION

Fedchenko S. M. Improvement of the method of calculating the fire resistance of reinforced concrete beams and crossbars. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Thesis for the Doctor of Philosophy Degree in Specialty 261 "Fire Safety". – Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of the National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, 2023.

Annotation content.

Relevance of the research topic. The rationale for choosing the research topic is dictated by the fact that under fire conditions, a significant place is occupied by predicting the fire resistance of reinforced concrete beams and crossbars, since their destruction and collapse pose the greatest danger to the lives

of people who are in buildings and emergency rescue units that eliminate the consequences of emergencies.

One of the main ways to increase the reliability of buildings in fire conditions is to ensure the normative fire resistance of reinforced concrete beams and crossbars. The most effective approach to forecasting the fire resistance of reinforced concrete structures is the calculation based on mathematical models of calculation methods. The prerequisite for the application of this approach is the study of the regularities of temperature distributions in the cross-sections of reinforced concrete beams during fire tests and the regularities of the decrease in the strength of concrete as a function of temperature, which is part of the initial data for solving strength problems for the calculated predicted assessment of the fire resistance of reinforced concrete beams during a fire.

The idea of the work is to provide the appropriate class of fire resistance of reinforced concrete beams and crossbars to increase the reliability of buildings based on the prediction of fire resistance by the method of identifying the dependence of the coefficient of reduction of concrete strength on temperature. For the implementation of this method, it is proposed to use similar data obtained by means of mathematical modeling based on the method of finite elements and specified material properties as data included in the set of measurement results during fire tests. Such data are the time dependence of temperature indicators at individual cross-section points and the dependence of the maximum deflection of the bolt on time under the conditions of thermal exposure of the standard fire temperature regime.

The purpose of the work is to reveal the regularities of changes in temperature distributions and concrete strength in the cross-sections of reinforced concrete beams depending on the duration of the thermal effect of the standard fire temperature regime as a scientific basis for improving the method of calculating the fire resistance of reinforced concrete beams and beams.

The main tasks of the research:

1. To perform the analysis of the current state of regulation and methods of assessing the fire resistance of reinforced concrete beams and crossbars in Ukraine and ways to improve methods based on the calculation approach.

2. To develop a method of interpolation of temperature distributions in the cross-section of reinforced concrete cross-sections based on point temperature measurements during fire tests and, based on it, to develop a method for identifying the coefficients of reduction in concrete strength of such reinforced concrete cross-sections.

3. To justify the methodology and to conduct tests of reinforced concrete beams and crossbars with its use, on the basis of which to perform interpolation of temperature distributions.

4. According to the determined temperature distributions, to perform the identification of the coefficients of reduction in the concrete strength of the reinforced concrete crossbar, to which the fire tests were applied.

5. To investigate the adequacy of the results obtained by the proposed method identification of the coefficients of reduction in the concrete strength based on the measurement data obtained as a result of fire tests of reinforced concrete crossbars, and determine the conditions under which their greatest accuracy is achieved.

6. To develop an improved method for calculating the fire resistance of reinforced concrete beams and crossbars, for which the obtained data on the reduction of concrete strength are part of the set of initial data.

The object of the study is the processes of heating, deformation and destruction associated with the onset of the limit states of fire resistance, which occur in reinforced concrete crossbars and beams under the conditions of thermal influence of the standard fire temperature regime.

The subject of the study is the regularities of changes in temperature distributions in cross-sections and the reduction of concrete strength of reinforced concrete beams and beams depending on their design parameters and the duration of thermal exposure of the standard fire temperature regime.

The scientific novelty of the dissertation consists in revealing the patterns of changes in temperature distributions and strength of concrete in cross-sections of reinforced concrete beams and crossbars depending on the duration of thermal exposure to the standard fire temperature regime. At the same time:

1. For the first time, the regularities of the dependences of the parameters of the interpolation functionals, which describe the temperature distribution in the cross-section of reinforced concrete cross-sections, from the time of tests under high temperature conditions for predicting the strength degradation of concrete and reinforcing steel of the cross-sections have been revealed.

2. For the first time, the method of identifying the dependence of the coefficient of reduction of concrete strength on temperature was proposed, based on the interpolation of temperature distributions in the cross-sections of reinforced concrete cross-sections during their fire tests based on point temperature measurements in the concrete layers and the deformation mathematical model of the stress-strain state of the cross-sections under the conditions of thermal exposure of the standard fire temperature regime.

3. For the first time, the regularity of the temperature dependence of the coefficient of reduction of concrete strength for reinforced concrete beams and crossbars in the conditions of their fire tests was revealed using the proposed method of its identification, which can be described by a regression dependence:

$$k_c(\theta) = 1 + 1.505 \cdot 10^{-3} \theta - 7.123 \cdot 10^{-6} \theta^2 + 6.655 \cdot 10^{-9} \theta^3 - 1.921 \cdot 10^{12} \theta^4.$$

4. The method of calculating the fire resistance of reinforced concrete beams and crossbars under the influence of the standard fire temperature regime has been improved as a result of using the obtained temperature dependence of the concrete strength reduction factor as part of the initial data to determine the time of onset of the limit state based on the loss of bearing capacity based on the solution of the strength problem according to the deformation mathematical model.

5. The field of application of the improved method of calculating the fire resistance of reinforced concrete building structures has gained further

development, and the possibility of its application to assess the fire resistance of reinforced concrete beams and crossbars under the influence of the standard fire temperature regime, which allows more precisely determining the fire resistance class of the building structure based on the determination of the actual fire resistance limit, has been scientifically substantiated.

Practical significance of the obtained results. The practical value of the dissertation research lies in the development of an improved method for calculating the fire resistance of reinforced concrete beams and crossbars. The application of the proposed method of assessing the fire resistance of reinforced concrete beams and crossbars will significantly increase the accuracy of data prediction during the analysis of the compliance of reinforced concrete beams and crossbars with the requirements of the norms regarding their fire resistance, which will improve the fire safety of buildings with reinforced concrete structures. In view of the above, the developed method can be used in the process of developing the relevant regulatory documentation for predicting the operation of reinforced concrete beams and crossbars in fire conditions.

The results of the research are implemented in the activities of the Institute of Public Administration and Scientific Research on Civil Defense during the implementation of scientific research works, development of normative and legal acts (act on the implementation of the results of the dissertation work of July 21, 2023) and in the activities of the Department of Emergency Prevention of the State Emergency Service of Ukraine, by approbation and practical application of the improved method of calculating the fire resistance of reinforced concrete beams and crossbars (act of implementation of the results of the dissertation work dated October 3, 2023) and in the educational process of the Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of the National University of Civil Protection of Ukraine for the preparation of specialists of the educational level "bachelor" at the faculty of safety of construction objects and labor protection in the specialty 261 "Fire safety » and specialty 263 "Civil security" (act on the implementation of the results of the dissertation work dated August 29, 2023).

Research methods. An experimental method of testing at high temperatures was used to study reinforced concrete beams and crossbars. The method of mathematical modeling was used to establish the main regularities for temperature distributions, concrete strength and parameters of the stress-strain state in the sections of reinforced concrete cross-sections. In the process of developing the method of calculation interpretation of the results of experiments, simplified standard methods of modeling the behavior of reinforced concrete beams and crossbars under the conditions of thermal influence of the standard fire temperature regime were applied. To study the reliability and adequacy of the results of experiments and modeling of thermal processes in the cross-section of reinforced concrete beams and crossbars under the conditions of thermal influence of the standard fire temperature regime, the methods of mathematical statistics are applied.

The introduction gives a general description of the dissertation work, substantiates the relevance of the research topic, formulates the goal, task, defines the object and subject of the research, indicates the scientific novelty and practical significance of the obtained results, reveals the connection of the work with scientific programs, plans and topics, defines a personal contribution of the applicant, data on approval, publications, structure and scope of work are given.

The **first chapter** analyzes the statistics of accidents at construction sites as a result of fires, reveals the main methods of predicting the behavior of reinforced concrete beams and crossbars when exposed to high temperatures, and also describes the methods of their implementation. The disadvantages and advantages of each method of predicting the behavior of reinforced concrete structures in the case of thermal and mechanical loading are substantiated. The patterns of changes in the strength of concrete and reinforcing steel at different heating temperatures are revealed.

Based on the results of the performed analysis, the goal and main tasks of the work were formulated.

In the **second chapter**, the mathematical model of the reinforced concrete beam is described and the mathematical modeling of the stress-strain state in the section of the reinforced concrete beam under the influence of the standard fire temperature regime is performed. After solving the thermal problems, data on the temperature distribution and parameters of the stress-strain state of the reinforced concrete crossbar under the conditions of exposure to the standard fire temperature regime were obtained. A method for identifying the temperature dependence of the coefficient of concrete strength reduction of reinforced concrete cross-sections and beams of rectangular section is proposed and substantiated, and it is also shown that the results obtained using the method of identification of the coefficient of concrete strength reduction are adequate, as their relative error does not exceed 6,4 % on average, and can be used to analyze the thermomechanical properties of concrete of reinforced concrete beams for an improved method of calculating the fire resistance.

The **third chapter** is devoted to the description of the experimental equipment for fire tests of reinforced concrete beams under the influence of the standard fire temperature regime and the methods of experimental research of the concrete strength of reinforced concrete beams. In this section, the composition of the mixture and the method of making samples are described, and the layout of the thermocouples is proposed. The main experimental equipment is an installation consisting of a fire furnace with a fuel-injector system on diesel fuel. The experiment was performed during the control time, which corresponds to the longest time of onset of the limit state loss of bearing capacity for reinforced concrete beams and crossbars.

The **fourth chapter** presents the results of experimental research. They showed that reinforced concrete beams have a time of onset of the limit state of loss of bearing capacity greater than 60 minutes, and the interpolation of the temperature distribution based on the results of the experiment using the developed methods confirmed that the chosen algorithm is stable and gives adequate results. Also, a refined temperature dependence of the concrete strength

reduction factor for reinforced concrete crossbars was obtained, which allows to significantly increase the accuracy of the calculation method of fire resistance assessment for structural elements of this type by 8%. A regression analysis was performed to analytically describe the obtained regularity of the concrete strength reduction of the reinforced concrete beam subjected to the test. As a result of the regression analysis, a regression equation was obtained that describes the obtained regularity of the decrease in concrete strength depending on the temperature, which has the following form:

$$k_c(\theta) = 1 + 1.505 \cdot 10^{-3} \theta - 7.123 \cdot 10^{-6} \theta^2 + 6.655 \cdot 10^{-9} \theta^3 - 1.921 \cdot 10^{12} \theta^4.$$

In the **fifth chapter**, the calculations of the maximum deflection of reinforced concrete beams are performed. On the basis of the obtained results, graphs of the reduction of the bearing capacity of these elements were drawn. Also, the adequacy of the calculation results was analyzed using the Fisher test, which does not exceed the table value and is equal to 0.97. The results obtained by the proposed method are sufficiently accurate, as the discrepancy with theoretical and experimental data is on average 10.9%.

Key words: reinforced concrete crossbar, reinforced concrete beam, combustion processes, fire resistance, heat flow, impact of fire, standard temperature regime, fire safety, computer simulation, concrete strength reduction factor, mathematical model, calculation method.

LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE THEME OF THE DISSERTATION

Articles in scientific and professional publications of Ukraine

1. S.M. Fedchenko Research on the reduction in the value of concrete of a reinforced concrete crossbar in fire-tested. *Communal dominion of the locality. Series: Technical sciences and architecture*. Kharkiv: KhNUMG im. O.M. Beketova. 2023. T. 6. (180). P 176-186.

<https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6208/6127>

2. Fedchenko S. Justification of the method of identification of mechanical characteristics of concrete of reinforced concrete beams based on the results of fire tests. *Emergency situations: prevention and elimination: collection of scientific works. Cherkasy: ChIFS named after Chornobyl Heroes of the National University of Civil Protection of Ukraine*. 2023. Vol. 7. № 1. P. 149-157. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.1.149.157>

3. Sidnei S., Kobko V., Fedchenko S., Zmaha M., Zaika N. Improvement of the zone method of checking the fire resistance of hollow slabs. *Emergency situations: prevention and elimination: collection of scientific works. Cherkasy: ChIFS named after Chornobyl Heroes of the National University of Civil Protection of Ukraine*. 2022. Vol. 6. № 1. P. 95–103. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.1.95-102>

4. Hvozd V., Nekora O., Sidnei S., Nedilko S., Fedchenko S., Tyshchenko Y. Research of fire resistance of elements of steel frames of industrial buildings, taking into account the level of mechanical load. *ChIFS named after Chornobyl Heroes of the National University of Civil Protection of Ukraine*. 2021. Vol. 5. № 1. P. 40–49. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524-2636.2021.5.1.-40-49>

5. Kovalyshyn V., Pozdieiev S., Fedchenko S. Concrete walls conduct under the fireinfluence investigationusing final elements method. *Emergency situations: prevention and elimination: collection of scientific works. Cherkasy: ChIFS named after Chornobyl Heroes of the National University of Civil Protection of Ukraine*. Vol.4 (2018). P. 89 – 98. URI: <https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/6482>

Articles in scientific and professional publications of other countries

6. Pozdieiev S., Nekora O., Fedchenko S., Shnal T. Method of Identification of Mechanical Characteristics of Concrete of Reinforced Concrete Crossbars according to the Results of Fire Tests *Construction Technologies and Architecture*. Trans Tech Publications Ltd. 2023. C. 9 P. 59 - 66. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-kev0Ho>

Publications in scientific publications included in the database Scopus

7. Pozdieiev S., Nekora O., Fedchenko S., Zaika N., Shnal T., Subota A., Nesukh M. Method for identifying the strength characteristics of concrete of a reinforced concrete crossbar during heating under conditions of fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. №3 (7(123)). 2023. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.282205>

8. Pozdieiev S., Shnal T., Kholod P., Fedchenko S., Nedilko I. Evaluation of fire resistance of reinforced concrete beams on the basis of use of parametric temperature curves of fire modes. *AIP conference proceedings «Reliability and durability of railway transport engineering structure and buildings»*. Kharkiv: Ukrainian state university of railway transport. AIP 2684. 030034 (31.05.2023). DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0120002>

Monograph

9. Pozdieiev S. V., Sidnei S. O., Hvozd V. M., Tyshchenko O. M., Nuianzin O.M., Nekora O. V., Shnal T. M., Berezovskyi A. I., Rudeshko I. V., Fedchenko S.M., Nedilko I.A. Reliability of the results of fire tests when assessing the fire resistance limit of load-bearing walls. *Monograph. Cherkasy: ChIFS named after Chornobyl Heroes of the National University of Civil Protection of Ukraine*. 2021. p. 100.

List of publications, which certify the approval of the dissertation

10. Nuianzin O. M., Pozdieiev S. V., Nedilko I. A., Fedchenko S. M., Borsuk O. V. Determination of the state of loss of fire resistance of steel beams with fire-resistant mineral wool cladding. X All-Ukrainian scientific and practical conference with international participation "Emergency situations: security and protection": abstracts of reports (Cherkasy, 29-30 October 2020). Cherkasy: *ChIFS named after Chornobyl Heroes of the National University of Civil Protection of Ukraine*. 2020. p. 120-121.

<https://chipb.dsns.gov.ua/upload/1/2/2/8/5/2/9/2020-10-29-zbirnik-nsbz-20.pdf>

11. Pozdieiev S. V., Fedchenko S. M., Nedilko I. A., Dankevych I., Kaniuk V. Fire resistance of reinforced concrete beams under the influence of parametric fire temperature regimes. *XI All-Ukrainian scientific and practical conference*

with international participation "Emergency situations: security and protection": abstracts of the reports (Cherkasy, 28-29 October 2021). Cherkasy: ChIFS named after Chernobyl Heroes of the National University of Civil Protection of Ukraine. 2021. p. 179-180. <https://chipb.dsns.gov.ua/upload/1/2/2/8/5/2/3/2021-10-26-nadzvicaini-situaciyi-zbirnik-tez-konferenciyi-2021.pdf>

12. Pozdieiev S. V., Shnal T. M., Kholod P. F., Fedchenko S. M., Nedilko I. A. Evaluation of fire resistance of reinforced concrete beams based on the use of parametric temperature curves of fire regimes. *IX International scientific and technical conference "Problems of reliability and durability of engineering structures and buildings in railway transport"*: abstracts of the reports (Kharkiv 17-18 November 2021). Kharkiv: UkrDUZT 2021. p. 160-161 http://conf.kart.edu.ua/images/stories/konf-1/pdf/Theses_2021_10.12.pdf

13. Pozdieiev S. V., Fedchenko S. M., Nedilko I. A., Zaika N. P., Sidnei A. S. Study of temperature distribution in reinforced concrete slabs during fire *XIII International Scientific and Practical Conference "Theory and Practice of Fire Extinguishing and Eliminating Emergency Situations"*: abstracts of reports (Cherkasy, 26 April 2022). Cherkasy: ChIFS named after Chernobyl Heroes of the National University of Civil Protection of Ukraine. 2022. p. 179-180. <https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2022/6.pdf>

14. Fedchenko S. M., Nekora V. S., Sidnei A. S., Pozdieiev S. V. Study of the dependence of the fire resistance indicators of steel elements on the level of mechanical load. *All-Ukrainian scientific and practical conference of cadets, students, adjuncts (post-graduate students) "Science of civil defense as a way to develop young scientists"*: abstracts of the reports (Cherkasy, 26 May 2022). Cherkasy: ChIFS named after Chernobyl Heroes of the National University of Civil Protection of Ukraine. 2022. p.66-68. https://chipb.net.ua/library/nauk_zbirnyk/

15. Pozdieiev S. V., Nekora O. V., Fedchenko S. M. Evaluation of fire resistance of reinforced concrete crossbar. *All-Ukrainian scientific and practical conference "Actual problems of fire safety and emergency prevention in today's*

conditions": abstracts of the reports (Lviv, 12-13 October 2022). Lviv: LDUBZhD. 2022. p. 135-138.

<https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/11068>

16. Pozdieiev S., Fedchenko S., Kapalo P. Assessment of the fire resistance of reinforced concrete crossbar *XII All-Ukrainian scientific and practical conference with international participation "Emergency situations: security and protection": abstracts of reports* (Cherkasy, 27 – 28 October 2022). Cherkasy: ChIFS named after Chernobyl Heroes of the National University of Civil Protection of Ukraine. 2022. p. 77-78.

<https://chipb.dsns.gov.ua/upload/1/5/1/1/8/0/1>

</gTG4Mzjniuitb9Waoili99FDDQUI4FF3CEp78K5A.pdf> .

17. Fedchenko S. M., Pozdieiev S. V. Clarification of the coefficient of reduction of concrete strength of reinforced concrete beams based on the results of fire tests *International scientific and practical conference of young scientists "Problems and prospects of ensuring civil protection": abstracts of reports* (Kharkiv, 20 – 21 April 2023). Kharkiv: NUCP of Ukraine 2023 p. 116.

https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2023/Problemy_ta_per_spektyvy.pdf

18. Pozdieiev S. V., Nekora O., Fedchenko S. M., Shnal T.M., The method of identifying the mechanical characteristics of concrete of reinforced concrete beams based on the results of fire tests *International Scientific and Practical Conference «Problems of Emergency Situations»: abstracts of reports* (Kharkiv, 19 May 2023 p.). Kharkiv: Ukrainian state university of railway transport. 2023 p. 110-111.

http://pesconf.nuczu.edu.ua/images/2022/Program_PES2023_130523_c.pdf

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	29
ВСТУП	30
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ НОРМУВАННЯ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ТА РИГЕЛІВ	41
1.1. Аналіз методів прогнозування поведінки залізобетонних балок та ригелів в умовах пожежі.....	41
1.2. Метод високотемпературних випробувань залізобетонних балок та ригелів	46
1.3. Розрахунковий метод прогнозування поведінки залізобетонних балок та ригелів в екстремальних ситуаціях за умови впливу високих температур ..	54
1.4. Математичне моделювання поведінки залізобетонних балок та ригелів в екстремальних ситуаціях у наслідок впливу високих температур	59
1.5. Висновки до розділу та основні завдання дослідження.....	73
РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ТА РИГЕЛІВ В УМОВАХ ТЕПЛОВОГО ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ.....	75
2.1. Математична модель залізобетонної балки.....	76
2.1.1. Математична модель теплопередачі у перерізі залізобетонної балки під тепловим впливом стандартного режиму пожежі.....	76
2.1.2. Розрахункові схеми залізобетонної балки для теплового розрахунку	80
2.1.3. Результати розв’язання теплової задачі.....	82
2.1.4. Математична модель напружено-деформованого стану у перерізі залізобетонної балки в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі	83

2.1.5. Розрахункові схеми залізобетонної балки для розрахунку міцності.....	93
2.1.6. Результати розв'язування задачі міцності	94
2.2. Обґрунтування методу ідентифікації механічних властивостей бетону залізобетонної балки та ригеля	96
2.2.1. Метод інтерполяції температур у перерізі залізобетонної балки та ригеля за результатами випробувань	97
2.2.2. Метод ідентифікації механічних властивостей бетону залізобетонної балки та ригеля за результатами випробувань.....	110
2.3. Висновки до розділу	115
РОЗДІЛ 3. ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	117
3.1. Експериментальне обладнання	117
3.2. Методика виготовлення та формування залізобетонних ригелів-зразків для випробувань	121
3.2.1. Виготовлення залізобетонного ригеля-зразка для високотемпературних випробувань	121
3.2.2. Розташування термопар у залізобетонному ригелі-зразку для високотемпературних випробувань	126
3.3. Методика високотемпературних випробувань залізобетонних ригелів-зразків	127
3.3.1. Методика підготовки обладнання та залізобетонних ригелів-зразків до високотемпературних випробувань	127
3.3.2. Методика виконання високотемпературних випробувань	128
3.4. Адекватність результатів інтерполяції температурного розподілу у перерізі залізобетонного ригеля	130
3.5. Висновки до розділу	136

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОВЕДІНКИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ РИГЕЛІВ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР	138
4.1. Результати високотемпературних випробувань залізобетонних ригелів - зразків	138
4.1.1. Результати попередніх досліджень міцності бетону залізобетонних ригелів-зразків	138
4.1.2. Результати високотемпературних випробувань залізобетонних ригелів	140
4.2. Інтерполяція температур у перерізі залізобетонних ригелів за результатами високотемпературних випробувань	147
4.3. Ідентифікація коефіцієнтів зниження міцності бетону залізобетонних ригелів за результатами випробувань	152
4.4. Висновки до розділу	155
РОЗДІЛ 5. ОБГРУНТУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ТА РИГЕЛІВ	157
5.1. Обґрунтування методу розв'язання задачі міцності для реалізації удосконаленого методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів	157
5.2. Застосування удосконаленого методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонної балки із прямокутним перерізом в екстремальних умовах високих температур	161
5.3. Застосування удосконаленого методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонного ригеля із ступінчастим перерізом в екстремальних умовах високих температур	165

5.4. Перевірка адекватності результатів розрахунку вогнестійкості залізобетонних ригелів із прямокутним перерізом за запропонованим методом	167
5.5. Висновки до розділу	170
ВИСНОВКИ.....	171
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	173
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	190
ДОДАТОК Б Акти впровадження результатів дисертації.....	195

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

НДС – напружено-деформований стан.

ТФХ – теплофізичні характеристики.

ГУ – граничні умови.

МСЕ – метод скінченних елементів.

СЛАР – система лінійних алгебраїчних рівнянь.

ВСТУП

Одним із основних джерел небезпеки обвалення будівельних конструкцій унаслідок теплового впливу пожежі є закладання недостатнього запасу їхньої міцності за таких екстремальних умов. При цьому наслідки обвалення конструкцій особливо загрожують безпеці людей у випадках коли ті знаходяться у приміщеннях будівлі, де пожежа триває довше, ніж гранично допустимий час стійкості конструкції. Обвалення конструкцій особливо небезпечне під час евакуації людей та роботи особового складу аварійно-рятувальних підрозділів, що здійснює локалізацію надзвичайних ситуацій у будівлі. Руйнування зігнутих елементів конструкції є дуже небезпечним фактором, оскільки вони мають найбільші габарити і несуть найбільше навантаження.

Для підвищення безпеки людей, що перебувають у будівлях в умовах теплового впливу пожежі, одним з найбільш ефективних способів є забезпечення нормованої вогнестійкості на основі розрахункових методів оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій цієї будівлі, зокрема залізобетонних ригелів та балок. Нині методи, що існують, мають достатній розвиток і структуровані ієрархічно: від найпростіших в основі до складних (здійснюється із залученням комп'ютерних програмних та апаратних засобів). Проте, для реалізації цих методів необхідний комплекс початкових даних, що містить термомеханічні характеристики матеріалів. На сучасному етапі досконалі відомості про міцність бетону залізобетонних ригелів та балок в умовах теплового впливу пожежі потребують уточнення з метою підвищення достовірності даних, отриманих методами розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних балок та ригелів.

Актуальність теми. В роботах С. Л. Фоміна, В. С. Шмуклера, С. В. Поздєєва, Г. Л. Ватулі, Б. Г. Демчини, П. Г. Круковського, В. В. Ніжника, О. В. Некори, Т. Lie, В. Bartelemi, Т. М. Шналя, М. Shäfer, D. Bernhart та ін.

широко розглянуті аспекти вирішення технічних завдань щодо забезпечення необхідної вогнестійкості залізобетонних конструкцій. Аналіз зазначених робіт показав, що невідповідність елементів залізобетонних конструкцій вимогам щодо їхньої вогнестійкості спричиняє падіння, обвалення конструкцій та матеріалів, а також небезпечну дію предметів, що розлітаються. Всі перелічені чинники мають місце у разі настання аварійного стану залізобетонних будівельних конструкцій під час пожежі. Найбільшу небезпеку при цьому становлять зігнуті елементи конструкцій, оскільки вони підтримують перекриття між поверхами та покриття дахів. Їх обвалення є особливо небезпечним під час евакуації людей та виконанні аварійно-відновлювальних робіт.

В процесі прогнозування поведінки зігнутих елементів залізобетонних конструкцій в умовах пожежі найбільш пріоритетним вважається метод вогневих випробувань зразків, діючі навантаження і габаритні розміри яких відповідають або наближені до реальних. До недоліків цього методу належать: дороговартісність і підвищена трудомісткість проведення випробувань, високий ризик обвалення випробовуваних елементів, якщо передчасно настане граничний стан втрати їхньої міцності, руйнування конструкції вогневої печі та ушкодження вимірювальних агрегатів. Обвалення випробовуваних зразків також є причиною травмування персоналу лабораторій. Крім цього, встановлення самого зразка та навантажувальних тягарів на цей зразок також пов'язане із додатковими ризиками обвалення під час підготування.

Також для визначення безпеки експлуатації будівель із залізобетонними ригелями та балками при вогневому впливі є використання методів, які засновані на використанні розрахункового підходу, що ґрунтується на математичних моделях розрахункових методів. Такі методи дозволяють врахувати граничні умови та габаритні розміри залізобетонних ригелів та балок, розміри яких наближаються до реальних елементів будівельної конструкції. Передумовою для застосування такого

підходу є вивчення закономірностей температурних розподілів у перерізах залізобетонних ригелів та балок під час вогневих випробувань та закономірності зменшення міцності бетону залізобетонних ригелів та балок, що є частиною початкових даних для вирішення задач міцності для розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних ригелів та балок в умовах пожежі.

На основі викладеного вище, можна сказати, що забезпечення пожежної безпеки у будівлях пов'язано із удосконаленням розрахункових методів прогнозування поведінки залізобетонних будівельних конструкцій, що ґрунтуються на використанні точних даних щодо механічних характеристик матеріалів. Тому вивчення закономірностей температурних розподілів у перерізах залізобетонних ригелів та балок під час стандартних високотемпературних випробувань та закономірностей зниження міцності бетону, що є частиною початкових даних для розв'язку задачі міцності, в процесі реалізації методу розрахунку на вогнестійкість цих елементів є завданням, що має суттєву актуальність.

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

Дисертація виконана в межах, окреслених розпорядженням Кабінету Міністрів України від 19.08.2015 № 844-р «Про схвалення Стратегії розвитку системи технічного регулювання на період до 2020 року», відповідно до п. 17 розділу 2 «Плану наукової і науково-технічної діяльності ДСНС України на 2021 рік», а також розділу 2 «Плану наукової і науково-технічної діяльності Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля (ЧІПБ) НУЦЗ (Національного університету цивільного захисту) України на 2021 рік». Дослідження було складовою частиною досліджень у рамках виконання науково-дослідної роботи в Черкаському інституті пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України «Удосконалення розрахункового методу прогнозування цілісності залізобетонних конструкцій в умовах пожежі» («Цілісність – залізобетон»),

державний реєстраційний номер НДР – 0121U109414, де здобувач був виконавцем.

Враховуючи вищевикладене, були сформульовані мета роботи і основні завдання дослідження.

Мета роботи полягає у розкритті закономірностей зміни розподілень температури та міцності бетону у перерізах залізобетонних ригелів та балок залежно від тривалості теплового впливу як наукового підґрунтя удосконалення методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів.

Основні завдання дослідження:

1. Виконати аналіз сучасного стану щодо нормування та методів оцінювання вогнестійкості залізобетонних ригелів та балок в Україні і шляхів удосконалення методів, що базуються на розрахунковому підході.

2. Розробити метод інтерполяції температурних розподілень у перерізі залізобетонних ригелів та балок за точковими вимірюваннями температури під час вогневих випробувань та на його основі розробити метод ідентифікації коефіцієнта зниження міцності бетону таких залізобетонних ригелів та балок.

3. Обґрунтувати методику та виконати з її використанням вогневі випробування залізобетонних ригелів, на основі яких виконати інтерполяцію температурних розподілень.

4. За визначеними температурними розподіленнями виконати ідентифікацію коефіцієнтів зниження міцності бетону залізобетонного ригеля, підданого вогневим випробуванням.

5. Дослідити адекватність результатів, отриманих за запропонованим методом ідентифікації коефіцієнту зниження міцності бетону за даними вимірювань під час вогневих випробувань залізобетонних ригелів і визначити умови, за яких буде досягнута їхня найбільша точність.

6. Розробити удосконалений метод розрахунку на вогнестійкість залізобетонних ригелів та балок, для яких отримані дані щодо зниження міцності бетону є частиною комплексу початкових даних.

Об'єкт дослідження – процеси нагрівання, деформації та руйнування, що пов'язані з настанням граничних станів вогнестійкості, що відбуваються у залізобетонних ригелях та балках в умовах стандартного температурного режиму пожежі.

Предмет дослідження – закономірності модифікації температурних розподілень у перерізах та зниження міцності бетону залізобетонних ригелів та балок взаємності від їхніх конструктивних параметрів та тривалості теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Методи дослідження. Для дослідження залізобетонних ригелів та балок застосовувався експериментальний метод випробувань в умовах дії високих температур. В процесі встановлення основних закономірностей для температурних розподілень, міцності бетону та параметрів напружено-деформованого стану у перерізах залізобетонних ригелів та балок використаний метод математичного моделювання. Для розроблення методики розрахункової інтерпретації результатів експериментів застосовані спрощені стандартні методи моделювання поведінки залізобетонних балок в умовах стандартного температурного режиму пожежі. Методи математичної статистики застосовані для оцінки адекватності отриманих результатів при вогневих випробуваннях та математичному моделюванні у перерізі залізобетонних ригелів та балок в умовах стандартного температурного режиму пожежі.

Наукова новизна дисертації полягає у розкритті закономірностей зміни розподілень температури та міцності бетону в перерізах залізобетонних ригелів та балок залежно від тривалості теплового впливу пожежі. При цьому:

1. Вперше виявлені закономірності залежностей параметрів інтерполяційних функціоналів, які описують температурний розподіл у перерізі залізобетонних ригелів та балок від часу випробувань за умов високих температур для прогнозування міцнісної деградації бетону та арматурної сталі ригелів та балок.

2. Вперше запропонований метод ідентифікації залежності коефіцієнта зниження міцності бетону від температури, заснований на інтерполяції температурних розподілень у перерізах залізобетонних балок та ригелів під час їхніх вогневих випробувань за точковими температурними вимірюваннями у шарах бетону та за деформаційною математичною моделлю напружено-деформованого стану ригелів та балок в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі.

3. Вперше виявлена закономірність температурної залежності коефіцієнта зниження міцності бетону для залізобетонних ригелів в умовах їхніх вогневих випробувань з використанням запропонованого метода її ідентифікації, що може бути описана регресійною залежністю:

$$k_c(\theta) = 1 + 1.505 \cdot 10^{-3} \theta - 7.123 \cdot 10^{-6} \theta^2 + 6.655 \cdot 10^{-9} \theta^3 - 1.921 \cdot 10^{12} \theta^4.$$

4. Удосконалено метод розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі у результаті використання отриманої температурної залежності коефіцієнта зниження міцності бетону як частини початкових даних для визначення часу настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності на основі розв'язання задачі міцності за деформаційною математичною моделлю.

5. Набула подальшого розвитку сфера застосування удосконаленого методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій і науково обґрунтовано можливість його застосування для оцінки вогнестійкості залізобетонних балок та ригелів в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі, який дозволяє більш точно

визначити клас вогнестійкості будівельної конструкції на основі визначення фактичної межі вогнестійкості.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджені результатами аналізу літературних джерел і нормативно-правових вимог щодо нормування методів оцінювання вогнестійкості залізобетонних балок та ригелів; відповідністю розроблених методів дослідження поставленій меті і завданням; адекватністю та достовірністю отриманих результатів вогневих випробувань залізобетонних ригелів; удосконалення методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів відповідно до вимог чинних національних стандартів; апробацією та практичним впровадженням результатів проведених досліджень.

Практичне значення отриманих результатів ґрунтується у розробленні удосконаленого методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних ригелів та балок. Застосування запропонованого методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних ригелів та балок дозволить суттєво підвищити точність щодо прогнозних даних під час аналізування відповідності залізобетонних ригелів та балок вимогам норм щодо їхньої вогнестійкості, що підвищить пожежну безпеку будівель із залізобетонними конструкціями. З огляду на вищевикладене, розроблений метод можна використовувати в процесі розроблення відповідної нормативної документації для прогнозування роботи залізобетонних ригелів та балок в умовах пожежі.

Розроблені методики впроваджені у діяльність Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту під час виконання науково-дослідних робіт, розробки нормативно-правових актів (акт про впровадження результатів дисертаційної роботи від 21 липня 2023 року) та у діяльність Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям Державної служби України з надзвичайних ситуацій, шляхом апробації та практичного застосування удосконаленого методу розрахунку на

вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів (акт впровадження результатів дисертаційної роботи від 3 жовтня 2023 року), а також в освітній процес Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України при підготовці фахівців освітнього рівня «бакалавр» на кафедрі безпеки об'єктів будівництва та охорони праці за спеціальностями 261 «Пожежна безпека» та 263 «Цивільна безпека» (акт про впровадження результатів дисертаційної роботи від 29 серпня 2023р.).

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати дисертаційного дослідження отримано здобувачем самостійно. Наукові положення та висновки дисертації належать автору.

Також особистий внесок здобувача висвітлений в наукових публікаціях, що відповідають тематиці дисертаційного дослідження:

- в науковій праці «Concrete walls conduct under the fireinfluence investigation using final elements method» [117] – проведено аналіз теплофізичних властивостей бетону в умовах нагрівання під час пожежі, розкрито основні аспекти реалізації методу скінченних елементів для вирішення теплової та структурної задач при удосконаленні методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій;

- в науковій праці «Достовірність результатів вогневих випробувань при оцінюванні межі вогнестійкості несучих стін» [123] – описано особливості математичного моделювання теплових процесів та особливості математичного моделювання напружено-деформованого стану будівельних конструкцій під час їх випробувань на вогнестійкість;

- в науковій праці «Evaluation of fire resistance of reinforced concrete beams on the basis of use of parametric temperature curves of fire modes» [124] – виявлено закономірності граничних пластичних моментів для залізобетонних балок та побудовані діаграми граничних моментів цих елементів;

- в науковій праці «Method for identifying the strength characteristics of concrete of a reinforced concrete crossbar during heating under conditions of fire» [125] – отримано температурні показники у контрольних точках перерізу та криву залежності максимального прогину від часу випробувань, що необхідні для реалізації метода ідентифікації міцності бетону залежно від температури його нагрівання. Показано, що ізотерми у перерізі залізобетонного ригеля можуть бути наближені параболою із перемінним показником ступеня, а крива максимального прогину відтворює відповідні дані, що отримуються під час вогневих випробувань;

- в науковій праці «Обґрунтування методу ідентифікації механічних характеристик бетону залізобетонних ригелів за результатами вогневих випробувань» [129] – обґрунтовано запропонований метод ідентифікації механічних характеристик бетону залізобетонних ригелів, що базується на результатах вогневих випробувань та отриманої уточненої залежності коефіцієнта зниження міцності бетону від температури при стандартному температурному режимі пожежі, на основі деформаційних моделей;

- в науковій праці «Удосконалення зонного методу перевірки вогнестійкості пустотної плити» [131] – досліджено розподілення температури у перерізах залізобетонних конструкцій за умов теплового впливу температурного режиму пожежі за математичними моделями, що були використані для визначення розподілу знижених механічних характеристик;

- в науковій праці «Дослідження вогнестійкості елементів сталевих каркасів промислових будівель з врахуванням рівня механічного навантаження» [132] – проведено чисельні експерименти щодо настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності вертикальних та горизонтальних конструкцій внаслідок утворення зони пластичних деформацій із врахуванням теорії пластичності;

- в науковій праці «Дослідження зниження міцності бетону залізобетонного ригеля в умовах вогневих випробувань» [133] –

розроблено експериментальну методику з обґрунтуванням кількості та параметрів дослідних зразків та у результаті проведених вогневих випробувань ригеля шляхом вимірювань температури та деформації зразків отримано набір контрольованих даних для ідентифікації коефіцієнтів зниження міцності бетону залізобетонного ригеля, підданого випробуванням. На основі використання отриманої закономірності зміни міцності бетону залізобетонного ригеля запропоновано удосконалений метод розрахунку на вогнестійкості залізобетонних ригелів та балок.

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати дослідження доповідалися на всеукраїнських, міжнародних, науково-практичних конференціях, таких як:

➤ X Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». (м. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020 р.);

➤ Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність на транспорті» (м. Харків: УкрДУЗТ, 2020 р.);

➤ IX Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (м. Харків: УкрДУЗТ, 2021р.);

➤ XI Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021 р.);

➤ XIII Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022 р.);

➤ Всеукраїнська науково-практична конференція курсантів, студентів, ад'юнктів (аспірантів) «Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених» (м. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022 р.);

➤ Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення» (м. Львів: ЛДУБЖД, 2022 р.);

➤ XII Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022 р.);

➤ Міжнародна науково-практична конференція молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту (м. Харків: НУЦЗ України, 2023 р.).

Публікації. Результати досліджень, що висвітлені у дисертації було опубліковано у 8 наукових працях, а саме 5 статей опубліковано у наукових фахових виданнях України, 1 стаття опублікована у закордонному науковому виданні, що має фахове спрямування, 2 публікації опубліковані та індексовані в наукометричній базі Scopus, 1 монографія, а також у 9 тезах доповідей на всеукраїнських та міжнародних наукових конференціях.

Структура дисертації та її обсяг. Робота містить анотацію, зміст, вступ, має п'ять розділів, загальні висновки, список використаних джерел і додатки. Загальний обсяг дисертації становить 198 сторінок, з них основного тексту 142 сторінки, 27 таблиць, 80 рисунків, список використаних джерел містить 133 найменування та займає 17 сторінок, а також 2 додатки на 9 сторінках.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ НОРМУВАННЯ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ТА РИГЕЛІВ

1.1. Аналіз методів прогнозування поведінки залізобетонних балок та ригелів в умовах пожежі

Аналіз досліджень, що наведені в роботах [1 – 25] показують, що в умовах впливу високих температур порушення загальної стійкості будівлі часто відбувається внаслідок руйнування ригелів, оскільки вони є у числі основних несучих елементів у каркасі споруди. У випадку обвалення несучих конструкцій, зокрема ригелів, виникає найбільший ризик травмування та загибелі людей, матеріальні збитки сягають максимальних значень тому, що коли вони втрачають несучу здатність, відбувається руйнування технологічного оснащення й знищення приміщень. Тому збереження несучої здатності ригелів та балок у разі високотемпературного впливу в умовах пожежі протягом заданого часу є першочерговим завданням для гарантування безпеки працівників.

Зігнуті залізобетонні елементи під час високих температур крихко руйнуються із дробленням бетону по всьому перерізі й оголенням поздовжньої арматури. У граничному стані за високих температур несуча здатність елементів обумовлена несучими спроможностями бетону й арматури [5 – 31]. У масивних зігнутих елементах у граничному стані, внаслідок нерівномірного прогрівання перерізу, навантаження сприймається тільки певною частиною перерізу.

Прогнозування роботи несучих будівельних конструкцій в умовах високих температур визначається часом настання першого граничного стану в перерізі елемента, нездатного нести нормативне навантаження [6 – 10]. За умови несучої здатності критерій роботи можна визначити за

схемою, наведеною на рис. 1.1, поширюючи її на ригелі й інші зігнуті залізобетонні елементи.

Умовою безпечної роботи будівельних конструкцій є збереження ними несучих і огорожувальних функцій в умовах високотемпературного впливу. Для прогнозування роботи будівельних конструкцій в умовах високих температур використовують експериментальні й розрахункові методи [32 – 50]. Сьогодні проблема безпечного функціонування будівельних конструкцій для людей, що знаходяться у будівлях в умовах високих температур вирішується за допомогою гарантування засад, за яких фактична несуча здатність цих будівельних конструкцій повинна бути більшою, ніж навантаження, що діє [32 – 50]. Тому вирішення цього завдання ділиться на знаходження двох складових: фактичної й необхідної несучої здатності. У ролі основного критерію безпечної роботи конструкцій в умовах високих температур, в основному, береться тривалість такого аварійного стану, за якої досягається граничний стан за ознакою втрати несучої здатності.

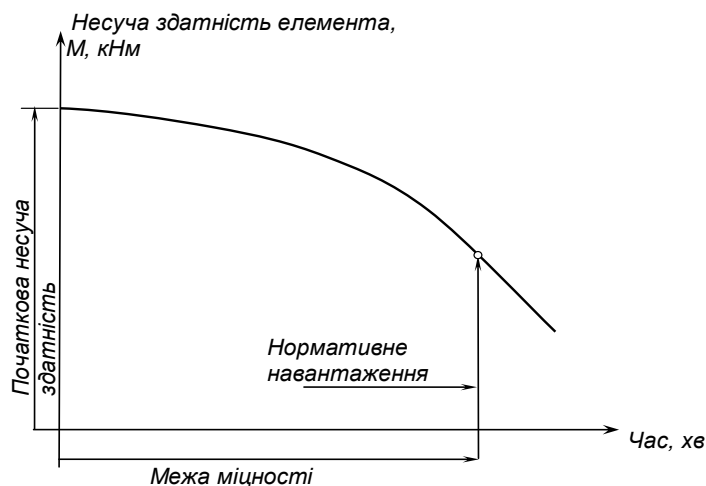


Рисунок – 1.1. Втрата несучої здатності зігнутого залізобетонного елемента в умовах високих температур

Метою моделювання високотемпературного впливу на залізобетонні ригелі та балки є розкриття розподілу температур у внутрішніх шарах

будівельних конструкцій у різні моменти часу теплового впливу. Цього можна досягти, якщо вважати бетон однорідним, неперервним середовищем і розв'язати рівняння теплопровідності, ввівши певні припущення [10, 14]. Задачі теплопровідності для залізобетонних конструкцій в умовах високотемпературного впливу мають певні характерні особливості. Для їхнього вирішення необхідно розглянути теплові процеси, які відбуваються у приміщенні під час аварій, умови теплообміну на поверхні конструкції й теплофізичні параметри у внутрішніх шарах конструкції. Всі перераховані фактори мають складний характер і є причиною того, що аналітичне рішення існує тільки для завдань у спрощеній постановці, що негативно позначається на точності отриманих результатів.

У більшості випадків визначають час настання граничного стану будівельних конструкцій в умовах високих температур на основі температурного режиму «стандартної» пожежі [32 – 50]. Стандартний температурний режим пожежі виражається такою формулою:

$$\theta_p(t) = 345 \cdot \lg(8t / 60 + 1) + \theta_0 \quad (1.1)$$

де: t – тривалість високотемпературного впливу у хв,

θ_0 – початкова температура в приміщенні, °C; $\theta_0 \approx 20^\circ\text{C}$;

У більшості випадків, дана залежність не описує реальну температурну криву у випадку аварій та пов'язаних із ними пожеж [10 – 13, 42, 43], і застосовується для відтворення стандартних вогневих випробувань.

Результати вивчення протікання пожежі у будівлях та спорудах [6 – 26] показали, що їхня інтенсивність і тривалість ранжується у кожному конкретному випадку і є відмінною від результатів спостережень, одержаних з використанням стандартної кривої «температура-час».

За умов високих температур у приміщенні можна виділити три періоди, Ці періоди відповідають різним стадіям розвитку аварійних ситуацій і пожеж. На першій стадії розвитку температура газів у приміщенні невисока (до 200°C). Для цього періоду вогнестійкість відповідних елементів не досліджується. Для другої стадії характерний швидкий ріст вигорання матеріалів, що зі свого боку викликає зростання температури в приміщенні та збільшення тепловиділення. На наступній стадії температура знижується, але, оскільки вона тривалий час залишається значно високою, її вплив на будівельні конструкції додається до впливу на попередній стадії.

Для різних будівель дослідниками [6 – 26] були показані різні температурні режими аварійних ситуацій, що пов'язані із пожежами (див. рис. 1.2).

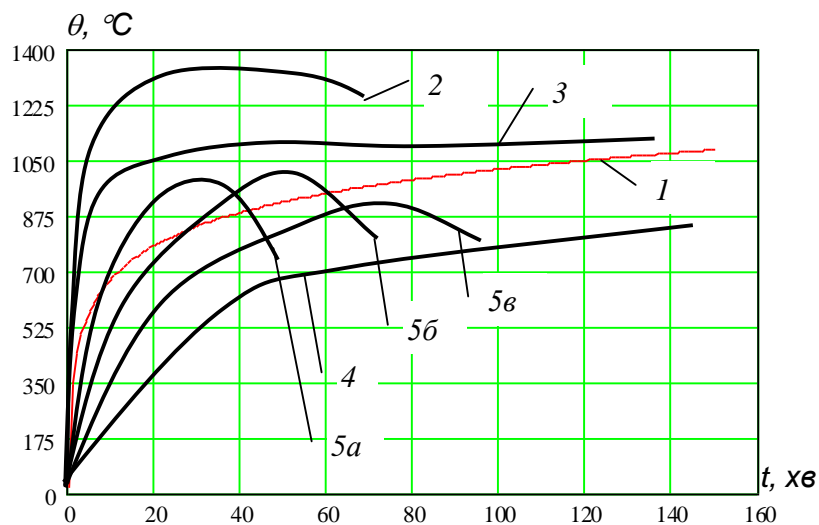


Рисунок – 1.2. Температурні режими аварійних ситуацій, пов'язаних із техногенними надзвичайними ситуаціями в приміщеннях будівель і споруд різного призначення [10]: 1 – температурна крива пожежі за стандартним режимом пожежі; 2 – температурна крива пожеж у тунелях; 3 – температурна крива пожеж у об'єктах хімічної промисловості; 4 – температурна крива пожежі у підвалі; 5 – температурні криві пожеж у житлових приміщеннях з різною геометрією прорізів (від *a* до *в* площа прорізів змінюється у діапазоні від 2 м² до 1 м²)

Для точнішого моделювання високотемпературного впливу можливі застосування й більш складних фізичних моделей. Розрахунки реалізують за допомогою програмного забезпечення. Спеціальні програми призначено для симуляції розвитку, поширення й затухання високотемпературних процесів у приміщеннях [51 – 55]. Алгоритми програм включають чисельні методи. Це такі методи, як метод Галеркіна, метод скінченних або граничних елементів, методи нев'язок, тощо, тобто методи для вирішення систем диференціальних рівнянь безперервних середовищ як рівняння Нав'є-Стокса, рівняння теплопровідності тощо, де враховуються всі можливі фактори, описати які неможливо, застосувавши аналітичні методи вирішення. До таких факторів належать будь-яка складність граничних умов та різного роду нелінійність в рівняннях.

Computational Fluid Dynamics (CFD) – це спеціальна група комп'ютерних систем. Такі комп'ютерні системи включають продукти STAR-CD, FLUENT, SOFIE та ін. Отримані результати розрахунків за цими програмами відповідають експериментальним дослідженням щодо температурних процесів у будівлях і використовуються для побудови температурних кривих з врахуванням всіх факторів впливу на температурний режим у разі такої ситуації. Нині відомі розрахункові дослідження вчених зі США, Франції, Швеції, Англії, Німеччини, Польщі та інших країн, що стосуються температури в приміщеннях під час високотемпературних процесів [32 – 62].

Проте, більшість розрахункових методик, застосовують стандартну температурну криву пожежі, або температурні криві реальних високотемпературних процесів до стандартної кривої [32 – 50]. Тому, якщо узагальнювати результати експериментів або розрахунків для прогнозування роботи будівель і споруд за умов високих температур з метою гарантування безпеки життєдіяльності людей бажано використовувати стандартну температурну криву. Ця крива є еталонною для відтворюваності результатів та відповідає світовим стандартам.

1.2. Метод високотемпературних випробувань залізобетонних балок та ригелів

Високотемпературні випробування зігнутих елементів, до яких належать залізобетонні ригелі та балки, виконують відповідно до стандартів [42 – 49]. Згідно із цими стандартами ригель або балка повинні бути піддані тепловій дії в умовах механічного навантаження, що повністю відповідає діючому навантаженню у них згідно із розрахунковою схемою конструкції будівлі. Прикладання навантаження відбувається, як правило, за допомогою спеціальних тягарів. Як тягарі використовують бетонні блоки. На рис. 1.3 показана схема подібних випробувань. Термічну дію у вогневих установках здійснюють шляхом спалювання газу або мазуту за допомогою форсунок. За відсутності особливих вимог, температурний режим має відповідати стандартному температурному режимові пожежі.

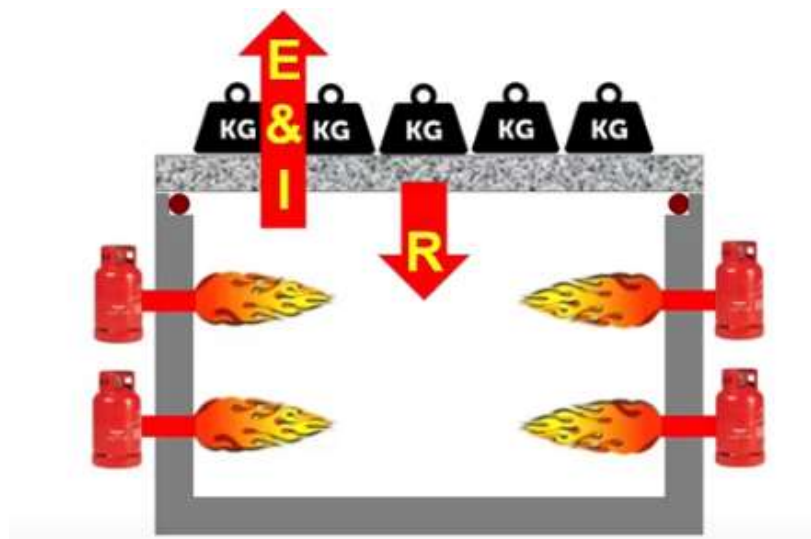


Рисунок – 1.3. Схема процедури проведення вогневих випробувань залізобетонних ригелів та балок

Випробувальна установка – це вогнева піч із огороженням, що має витримувати навантаження з боку досліджуваного елемента та навантаження тягарів, які встановлені на цей елемент. Схема установки для випробувань згідно зі стандартом [42, 43] зображена на на рис. 1.4.

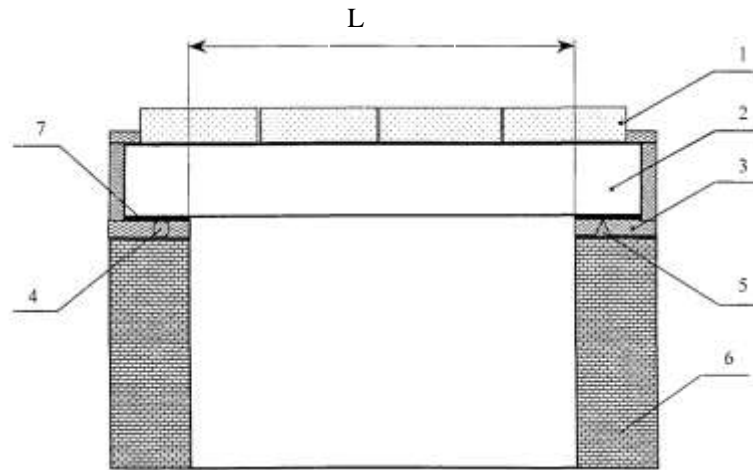


Рисунок – 1.4. Установка для вогневих випробувань горизонтальних елементів [43]: 1 – прикладене навантаження; 2 – зразок залізобетонного елемента для випробувань; 3 – ущільнення; 4, 5 – опори для досліджуваного зразка; 6 – огороження печі; 7 – сталеві пластини

Система чинних стандартів України [42 – 49] повністю визначає комплекс вимог щодо конструкції випробувальних установок, зразків, контрольно-виміральної апаратури, послідовності виконання процедур випробувань та прикінцевого оброблення їхніх результатів.

Конструкція вогневих печей має давати можливість нагрівання ригелів та балок з трьох сторін [43]. Їхні розміри повинні забезпечувати можливість випробовувати зразки, розміри яких відповідають проектним розмірам цих елементів будівельних конструкцій. Якщо це зробити неможливо, стандартами [42, 43] дозволено випробовувати зразок із мінімальною довжиною – 4000 мм, що відповідає мінімальній ширині вогневої камери печі.

Товщина футеровки огороження печі має бути не меншою за 50 мм, а її матеріал – забезпечувати відповідну термоізоляцію камери. Теплова інерція під час нагрівання до температури 500 °С повинна задовільняти таку умову:

$$\sqrt{\lambda \rho c} \leq 500 \text{ Вт с}^{1/2}/(\text{см}^\circ\text{C}^{-1}), \quad (1.2)$$

де: ρ – густина, кг/м^3 ;

λ – коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$;

c – питома теплоємність, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$.

Паливно-форсункова система має також відповідати певним вимогам. Перша вимога полягає у тому, що паливно-форсункова система повинна працювати на рідкому паливі (гасі, дизелі). Друга вимога стосується пальників. Пальники (форсунки) повинні синхронно включатися із максимальною різницею у 60 с. Третя вимога до факелів полягає у тому, що вони не повинні торкатися обігрітих поверхонь зразків.

Навіть, якщо неухильно дотримуватися вимог стандартів під час виготовлення випробувальних установок, останні будуть мати низку недоліків. По-перше, незрозумілим чином обрано мінімальний розмір зразків. По-друге, стандарти [42, 43] повинні давати чіткі настанови щодо розташування пальників та вентиляційних отворів для забезпечення рівномірного обтікання пічними газами випробовуваних зразків. По-третє, розміри камери печі та товщина огороження мають бути також регламентовані стандартами [42, 43]. По-четверте, матеріали огороження та футеровка повинні також бути рекомендовані у стандартах [42, 43].

Конструкція огороження печі має забезпечувати встановлення зразка для проведення випробувань на ньому. Міцність його має бути такою, щоб витримувати вагу самого зразку та прикладене до нього навантаження.

Зразки балок мають випробовуватися під навантаженням, яке повністю відповідає навантаженням згідно з розрахунковою схемою, включно зі згинальними моментами. У випадку, коли з технічних причин неможливо відтворити відповідне навантаження, що є у розрахунковій схемі, стандартами [42, 43] допускається проводити випробування залізобетонних балок та ригелів без навантаження.

Навантаження на зразки встановлюють, за умови створення напружень у розрахункових перерізах зразків, відповідно проєктним

значенням від постійних і тимчасових тривалих навантажень в їхніх нормативних значеннях. Умови кріплення та спирання зразків, розподілення навантаження мають відповідати схемам розрахунку, що вказані у технічній документації на ці конструкції. Якщо неможливо через технічні труднощі забезпечити відповідне спирання залізобетонного ригеля або балки в установці для випробування, стандартами [42, 43] допускається їхнє встановлення як вільно обпертих. Для створення відповідного навантаження в діючих лабораторіях України застосовуються тягарі. У ролі таких тягарів використовуються бетонні блоки, які встановлюють на металеві траверси. В цьому випадку під час випробувань забезпечуються умови, щоб під час деформації зразка вантажі не зміщувались [42, 43].

Коли застосовують гідравлічний навантажувальний вузол для навантаження зразка, повинні бути забезпечені умови роботи ригелів або балок, які визначені у технічній документації на зразок. Навантаження необхідно підтримувати у межах $\pm 5\%$ від необхідної величини протягом усього часу випробування.

Навантаження на досліджуваний зразок визначають у відповідності до умови створення напружено-деформованого стану у розрахункових перерізах зразків, передбачених проєктною документацією. Зразок встановлюють на огороження печі, згідно з умовами його закріплення. Для уникнення витікання гарячих газів з печі виступаючі кінці випробовуваного ригеля слід ізолювати шаром з мінеральної вати. Товщина ізолюючого шару повинна бути $100 \text{ мм} \pm 10 \text{ мм}$, а густина $120 \text{ кг/м}^3 \pm 30 \text{ кг/м}^3$.

Вимірювання деформацій відбувається у місці найбільшого прогину, що очікується, тобто посередині прольоту ригеля. Досліджувані елементи не менше ніж за 15 хв до початку вогневого випробування, відповідно до його технічної документації, навантажуються тягарцями. Процес завантаження зразків виконується

згідно з вимогами [42, 43]. Для імітації зосередженого навантаження застосовують систему точкового навантаження у двох точках на металеві пластини, що розташовані на відстані одної третини довжини ригеля від його країв. Для відтворення згинального моменту, відповідне навантаження рекомендовано прикладати на відрізок не менше ніж 500 мм від середини довжини балки.

Підготовка випробувальної установки проводиться відповідно до інструкцій експлуатації вогневих печей та засобів виміральної техніки. Деформації в зразках, що виникають при прикладанні навантаження, після їхньої стабілізації необхідно виміряти та зареєструвати. Стандартами допускається випробування двох зразків одночасно.

На підставі вказаних особливостей, можна зазначити, що випробування залізобетонних ригелів без навантаження повинно бути обґрунтовано, оскільки за такого способу випробувань не врахована міцність і тип бетону та арматурної сталі, геометричні параметри, величина діючого навантаження та ін. Крім цього, повинно бути обґрунтоване одночасне випробування декількох зразків, так само як і взаємне їхнє розташування.

У випадку виконання випробувань із дотриманням вищевказаних умов можуть з'явитися істотні похибки, які обумовлені наступними недоліками. Основним недоліком створених умов за цими вимогами є те, що замовнику надана можливість випробувати залізобетонні ригелі та балки без навантаження. Водночас, немає чітких вимог до обґрунтування критеріїв настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності у результаті вогневого впливу нагрівальної системи печі. Як недолік слід визначити відсутність вимог до розташування ригелів, що піддаються вогневому впливу без навантаження у печі з метою забезпечення рівномірності обігріву. Ще одним недоліком є відсутність вимог до

способу прикладення навантажень та способу точного розташування ригеля на огороженні печі.

Означені недоліки у системі вимог до виконання випробувань без навантаження можуть спричинити відсутність контролю за процесами, які значно впливають на кінцевий результат. Також можна отримати дані, які відрізняються від реальних даних.

У випадку створення вищевикладених умов в реальних установках можуть виникнути ускладнення [42, 43], які полягають у неможливості реалізувати будь-яке закріплення ригелів окрім шарнірного, неможливості забезпечити інший спосіб навантаження окрім рівномірно розподіленого. Крім цього, вимоги стандартів не регламентують послідовність та спосіб створення навантаження, допустимі похибки при розташуванні ригелів в установці.

Контрольно-вимірвальна система випробувальних установок для ригелів і балок, складається з двох основних груп приладів, які мають спеціальне призначення. Перша група складається із приладів для вимірювання температури у контрольних точках простору камери печі та залізобетонних балок і ригелів, що випробовуються.

Для вимірювання температури в печі використовуються термопари типу ТХА. Також можна використовувати термопари інших типів відповідно до ДСТУ 2837 [44], що працюють в діапазоні від 0 до 1300 °С з діаметром дроту не більше 1,5 мм та перетворювачі температури, що гарантують інструментальну похибку вимірювання температури у печі (± 15) °С [42, 43].

Можуть застосовуватися термопари, що покриті захисним кожухом або термопари з неізольованими дротами. На довжині 25 мм від вимірвального спаю має бути видалений захисний кожух термопари. Схематичне зображення термопари, що призначена для вимірювання температури в печі зображено на рис. 1.5. Вимірвальний спай термопари повинен бути звареним [42, 43].

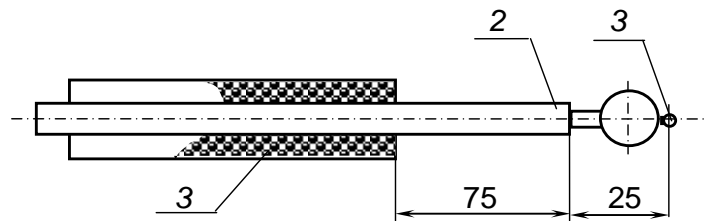


Рисунок – 1.5. Конструктивна будова термопары для високотемпературних випробувань [42]: 1 – оболонка для теплозахисту; 2 – захисний кожух; 3 – спай для вимірювання температури

Вимірювання термопарами температури в печі необхідно проводити у п'яти місцях. Водночас на кожні $1,5 \text{ м}^2$ отвору печі та на кожні $0,5 \text{ м}$ довжини встановлюється одна термопара. Необхідно щоб вимірювальний спай термопар розміщувався на відстані від 9 см до 11 см від поверхні залізобетонного зразка, а відстань від нього до стінок вогневої печі відповідала 20 см і більше.

При випробуванні залізобетонних ригелів та балок без навантаження, термопары потрібно встановлювати рівномірно посередині його висоти для отримання розподілення значень температури по перерізу у напрямках двох осей. Для таких елементів також необхідно встановити не менше трьох термопар з кожного боку рівномірно по його довжині на робочій арматурі, що найбільш наближені до поверхонь зразка.

Термопары, для проведення вогневих випробувань, повинні відповідати вимогам щодо їхніх технічних характеристик. Відповідні дані подані в табл. 1.1.

Таблиця 1.1. Вимоги до технічних параметрів термопар

Вимірювання температури	Тип термопары	Діаметр дроту, мм	Межі вимірювання, °C	Похибка, °C
у камері печі	ТХА	$\leq 1,5$	0 – 1300	± 15
у балці чи ригелі	ТХА	$\leq 0,75$	0 – 600	± 10

Вищевказані вимоги дозволяють ефективно контролювати температуру у камері вогневої печі. Проте, вимоги стандартів [42, 43] не можуть повністю забезпечити якісний контроль температури. Серед причин цього можна назвати декілька недоліків. Одним з важливих недоліків є обґрунтування саме такого розташування термопар у перерізі ригеля рівномірно по середній вертикалі і горизонталі. Також, суттєвим недоліком є відсутність обґрунтування щодо розташування термопар на поверхні ригелів по його довжині. Стандартами на випробування балок і ригелів [42, 43] не встановлена кількість термопар у внутрішніх шарах їхнього перерізу. До недоліків також належить необґрунтоване заниження верхньої границі діапазону вимірювання температури у перерізах залізобетонних ригелів. Можна як недолік вказати необґрунтовано велику похибку, що закладається для вимірювання температури у перерізах залізобетонних ригелів та балок.

До другої групи слід зарахувати контрольно-вимірювальні прилади для визначення деформаційних та силових показників напруженого стану балок та ригелів під час випробування. У випадку випробувань з прикладанням механічного навантаження за допомогою силової гідравліки вимірюють силу, яку прикладають з боку домкратів, та поперечні переміщення в середині балки або ригеля. Ці вимірювання здійснюють вимірювальні прилади, технічні характеристики яких зведені до табл. 1.2.

Таблиця 1.2. Вимоги до технічних параметрів приладів для вимірювання показників напружено-деформованого стану ригелів та балок

Тип приладу	Призначення	Похибка
Штатний динамометр силового пресу	Вимірювання навантаження на зразок	$\pm 5 \%$
Градуйована планка (лінійка), індикатори, лазерні дальноміри	Вимірювання переміщень ригеля	$\pm 2 \text{ мм}$

Стосовно вимоги до контрольно-вимірювальних приладів, призначених для фіксування деформаційно-силових показників, можна вказати на такі недоліки: немає вимог до точності приладів визначення силових навантажень; не визначена похибка приладів для контролю переміщень ригелів або балок; немає обґрунтованих вимог щодо положення точок, в яких визначаються переміщення; немає обґрунтованих вимог щодо положення точок, в яких спостерігається переміщення та типу утворених деформацій.

1.3. Розрахунковий метод прогнозування поведінки залізобетонних балок та ригелів в екстремальних ситуаціях за умови впливу високих температур

Експериментальний метод прогнозування роботи залізобетонних балок та ригелів в умовах високих температур на основі високотемпературних випробувань з урахуванням його недоліків не завжди може бути коректно застосований, оскільки, результати, що отримують при цьому не можна вважати прямими. Це обумовлене в основному неможливістю відтворити під час експерименту повну відповідність умовам закріплення і навантаження елемента за його роботи як складової частини цієї конструкції. Розрахункові методи прогнозування роботи залізобетонних конструкцій в умовах високих температур не мають таких обмежень і широко застосовуються на стадії проектування будівель і споруд, які б відповідали вимогам будівельних норм щодо їхньої вогнестійкості [15 – 23].

Задача визначення міцності залізобетонної балки та ригеля в умовах навантаження та теплової дії за формальним підходом є задачею термомеханіки і за загальних вимог має бути розв'язана за допомогою системи рівнянь напружено-деформованого стану (НДС) залізобетону та рівнянь теплопередачі. Такий розв'язок, з урахуванням нелінійних ефектів, які властиві залізобетону, є неможливим в аналітичному вигляді [63 – 66]. Тому для розрахунку міцності залізобетонних ригелів використовують

підходи, що засновані на розгляді НДС в умовах теплового впливу, а можуть і не розглядати його. Останній підхід заснований на застосуванні методів, що прогнозують роботу будівельних конструкцій в умовах високих температур за аналогією. Ці методи використовують узагальнений великий обсяг даних експериментальних високотемпературних досліджень елементів будівельних конструкцій у вигляді таблиць, які для залізобетонних балок та ригелів за конструктивними особливостями визначають відповідний для них час настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності. Всі інші розрахункові методи мають так чи інакше використовувати математичні моделі, що ґрунтуються на теоретичних уявленнях про поведінку залізобетону в умовах термовпливу, а також математичні моделі, отримані методами математичного моделювання за принципом «чорної скрині» [63 – 66]. Відповідно до цього розрахункові методи мають різний рівень складності, і їх можна умовно поділити на спрощені та уточнені.

На рис. 1.6. подана структурна схема спрощених розрахункових методів прогнозування роботи залізобетонних ригелів та балок при пожежі.



Рисунок – 1.6. Структурна схема спрощених розрахункових методів прогнозування роботи залізобетонних ригелів та балок в умовах дії високих температур

Спрощені методи не потребують складних розрахунків, реалізуються за мінімумом початкових даних, тому набули широкого застосування, а їхні процедури увійшли до стандартних методик відповідних норм багатьох провідних держав [6 – 27].

Вищевказані методи мають серйозний недолік. Цей недолік полягає у виникненні похибки результатів розрахунків (близько 25 – 30 %) [67 – 72]. Вказана похибка ґрунтується на тому, що використовувані моделі є дуже простими. Також можна вказати на їхню недостатню гнучкість, оскільки комплекс початкових даних не враховує структурні особливості залізобетону. В табличному методі або методі критичної температури навіть не враховано діючі навантаження.

Уточненими розрахунковими методами прогнозування роботи залізобетонних ригелів та балок в умовах високих температур є методи, засновані на підході, що ґрунтується на використанні систем диференціальних рівнянь пружнопластично деформованого тіла. Ця задача є термопружнопластичною задачею для твердих тіл, для її розв'язання застосовують чисельні методи, що ґрунтуються на сітковій дискретизації розрахункових областей. Числову реалізацію таких методів можуть виконувати за допомогою спеціальних або універсальних комп'ютерних систем. Багато робіт [67 – 72] показують, що такі методи успішно застосовують для прогнозування вогнестійкості зігнутих елементів залізобетонних конструкцій. Відомі роботи, які містять відомості про результати моделювання з врахуванням всіх особливостей поведінки залізобетонних ригелів і балок під час їхніх високотемпературних випробувань з використанням алгоритмів реалізації цих методів із залученням методу скінченних елементів.

До переваг цих методів слід зарахувати те, що за умов їх застосування можна отримати великий обсяг даних щодо напружено-деформованого стану, які дозволяють встановити причини і сценарії

руйнування ригелів та балок. Окрім цього, вони дають можливість більш досконало проконтролювати достовірність одержуваних результатів.

Серед недоліків цього підходу вагоме місце посідає неможливість врахування всіх технологічних особливостей залізобетону, таких як наявність зайвої вологи, пластифікувальних домішок і модифікаторів, розміри та форма крупного заповнювача, фракція дрібного заповнювача тощо. З цим пов'язана додаткова похибка. Також серед недоліків слід вказати на складність обчислювальних операцій та обмеження у застосуванні програмного забезпечення.

Для проведення прогнозування роботи залізобетонних балок та ригелів в умовах високих температур ефективно використовують експериментально-розрахункові методи.

Різновид підходу для застосування експериментально-розрахункових методів полягає в проведенні комплексу лабораторних випробувань малих зразків і подальшим математичним обробленням одержаних результатів з метою їхньої відповідної інтерпретації. Широкого застосування на практиці набули експериментально-розрахункові методи [47, 72 – 81], засновані на ідентифікації теплофізичних характеристик (ТФХ) бетону за результатами випробувань щодо нагрівання зразків з використанням різних температурних режимів, геометричних параметрів випробовуваних бетонних зразків. ТФХ, що при цьому визначаються, можуть бути отримані як сталі, або температурно залежні коефіцієнти рівняння теплопровідності [82 – 85].

Ефективність цих методів зумовлена змогою врахування феноменології технологічних особливостей бетону прямими дослідженнями із залученням порівняно недорогих і малотрудомістких експериментів.

Недоліком такого підходу є те, що під час прогнозування роботи залізобетонних ригелів та балок в умовах високих температур їхнє застосування обмежено внаслідок того, що при цьому міцнісні

характеристики залізобетону не визначаються, а використовуються їхні універсальні значення, що є причиною появи значних похибок. Крім того, такі методи застосовують у комплексі із спрощеними розрахунковими методами міцнісного розрахунку.

В роботах [64 – 79] запропонований універсальний ефективний підхід, що виконує не тільки визначення ТФХ, а й уточнення міцнісних характеристик бетону та арматурної сталі у вигляді їхніх коефіцієнтів роботи в умовах високих температур. Також цей метод є більш точним, але водночас виникає необхідність застосування більш складних математичних моделей напружено-деформованого стану матеріалу залізобетонних ригелів та балок в умовах високих температур. Це спричиняє збільшення кількості та складності розрахункових процедур, а також висуває підвищені вимоги до кваліфікації персоналу, що здійснює розрахунки.

Спільним недоліком всіх підходів із залученням експериментально-розрахункових методів є необхідність проведення експериментів щодо випробувань малих зразків. Це викликає необхідність проведення додаткового дослідження щодо встановлення критеріїв переходу від результатів, отриманих для малих зразків, до реальних конструкцій. Ці дослідження потребують виконання значного обсягу експериментальної роботи, включно з випробуваннями натурних зразків реальних конструкцій. Іншим суттєвим недоліком є відсутність єдиних вимог до експериментального обладнання, що реалізує цей підхід. Також для втілення такого підходу необхідне визначення режиму випробувань, що враховував би граничні ефекти. До таких ефектів, наприклад, належать вплив тріщинуватої структури зразка, вплив нерівномірності нагрівання та інші.

1.4. Математичне моделювання поведінки залізобетонних балок та ригелів в екстремальних ситуаціях у наслідок впливу високих температур

Математичні моделі, які застосовано в процесі реалізації методів прогнозування роботи залізобетонних балок та ригелів в умовах високих температур, можна розділити на загальні для всіх методів і на окремі моделі, що застосовуються у конкретних методах або їхніми групами.

Для реалізації всіх без винятку методів, включно з високотемпературними випробуваннями, є математична модель високотемпературного впливу. У функції номінального режиму теплової дії у випадку аварій в приміщеннях застосовують стандартну температурну криву пожежі [32 – 50], що описана виразом (1.1). Цю математичну модель застосовують з метою можливості порівняння експериментальних і розрахункових результатів, оскільки за такої умови можна використовувати одні й ті самі критерії для оцінювання роботи елементів залізобетонних будівельних конструкцій за умови дії високих температур.

В процесі постановки завдання слід врахувати певні особливості залізобетону як складного матеріалу із врахуванням, що його структура постійно змінюється [80, 84]. Це є причиною необхідності прийняття деяких загальних спрощувальних гіпотез для розрахункових методів. Одна з них полягає у окремому розв'язанні теплової і міцнісної задач. Тобто, під час застосування розрахункових методів спочатку визначають температурні розподіли у внутрішніх шарах елементів конструкцій за результатами розв'язку задачі теплопровідності, а потім розв'язують задачу аналізу напружено-деформованого стану залізобетону за умови прикладання температур як додаткового навантаження. Такий підхід застосовують у припущенні, що параметри напружено-деформованого стану слабко впливають на умови теплопередачі. У результаті теплового впливу під час пожеж внутрішні шари бетону залізобетонних ригелів та

балок прогріваються до високих температур (1 000 °C і вище), що дуже їх послаблює і приводить до того, що міцність сильно зменшується. Деградація матеріалу зумовлює швидке зменшення їхньої несучої здатності і відбувається повне, або часткове руйнування. Поведінку залізобетонних ригелів та балок в умовах високих температур можна розбити на певну кількість етапів [86 – 93]. На першому етапі залізобетонна балка або ригель не відчуває істотних змін, також несуттєво зростають деформації згину, що спричиняє ріст сил у стисненій зоні і навантаження на арматурні стержні. На другому етапі відбуваються утворення та розкриття магістральних тріщин і пришвидшення нарощування прогинів. Це показує, що балка має суттєві ушкодження та набуває незворотних змін. На третьому етапі виникає стан втрати стійкості. Утворюється зона локального руйнування у серединній зоні, поздовжні переміщення у стиснутій зоні та прогин балки швидко зростає. У зоні ушкодження, стиснута зона бетону пошкоджується і роздроблений бетон випинає робочу арматуру. Зовнішній шар бетону обвалюється, оголюючи її. Такі наслідки теплового впливу вказують на настання граничного стану, за яким відбувається обвалення балки, або досягнення нею критичних значень швидкості наростання прогину чи максимального прогину. В момент досягнення граничних деформацій фіксується втрата несучої здатності залізобетонної балки або ригеля. На рис. 1.7 показані приклади залізобетонних ригелів з наслідками високотемпературного впливу.

Зважаючи на всі ці обставини, розрахунок потрібно робити з урахуванням пластичного деформування бетону і арматурної сталі, а також допускати значні переміщення ригелів та балок.



Рисунок – 1.7. Наслідки впливу високих температур на залізобетонні ригелі та балки

Щоб врахувати фізичну та геометричну нелінійність потрібно у розрахунок закладати закони зміни міцнісних та пружнопластичних властивостей бетону та арматурної сталі. Ці властивості враховують, коли використовують діаграми деформування компонентів залізобетону [46, 47].

Характер деформування арматурної сталі є дещо іншим, але як і для випадку з бетоном також чинні норми України [46, 47] щодо розрахункового прогнозування роботи залізобетонних ригелів в умовах дії високих температур, рекомендують враховувати спадну гілку діаграми деформування. Таким чином ці діаграми спочатку подібні до діаграм Прандтля із нелінійним переходом на горизонтальну ділянку, а на кінцевій ділянці мають спадний характер, що повністю відтворює поведінку арматурних стрижнів в умовах навантаження на всьому діапазоні навантажень, які можна прикладати.

На рис. 1.8 показані повні діаграми деформування бетону. Згідно з рис. 1.8 діаграми деформування мають спадні ділянки, а максимальне значення стискаючого напруження залежить від температури нагрівання бетону.

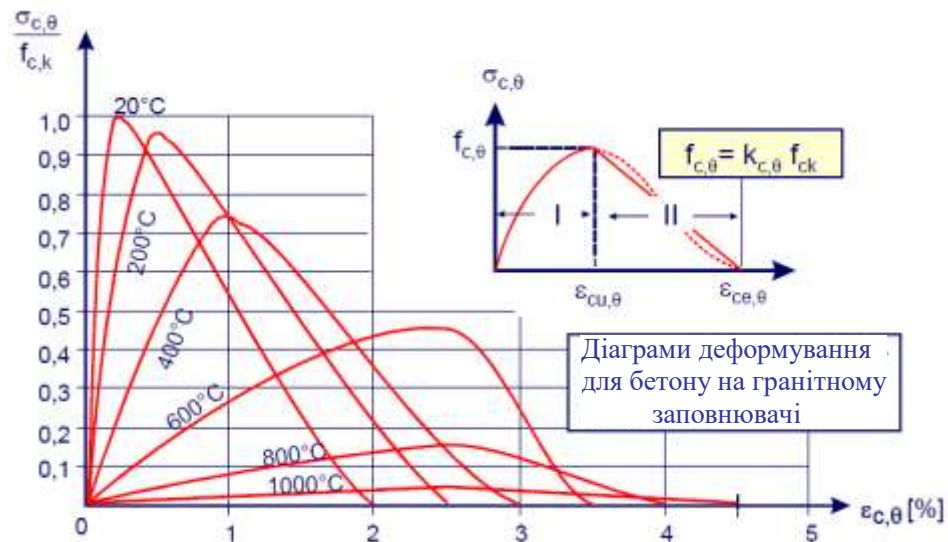


Рисунок – 1.8. Діаграми деформування бетону для різних температур його нагрівання [6]

В процесі побудування діаграм деформування арматурної сталі також враховують зниження міцності внаслідок нагрівання. Водночас вважають, що деформації, що характерні для границь характерних ділянок не залежать від температури нагрівання. На рис 1.9 представлені приклади діаграм деформування для звичайної попередньо ненапруженої арматурної сталі.

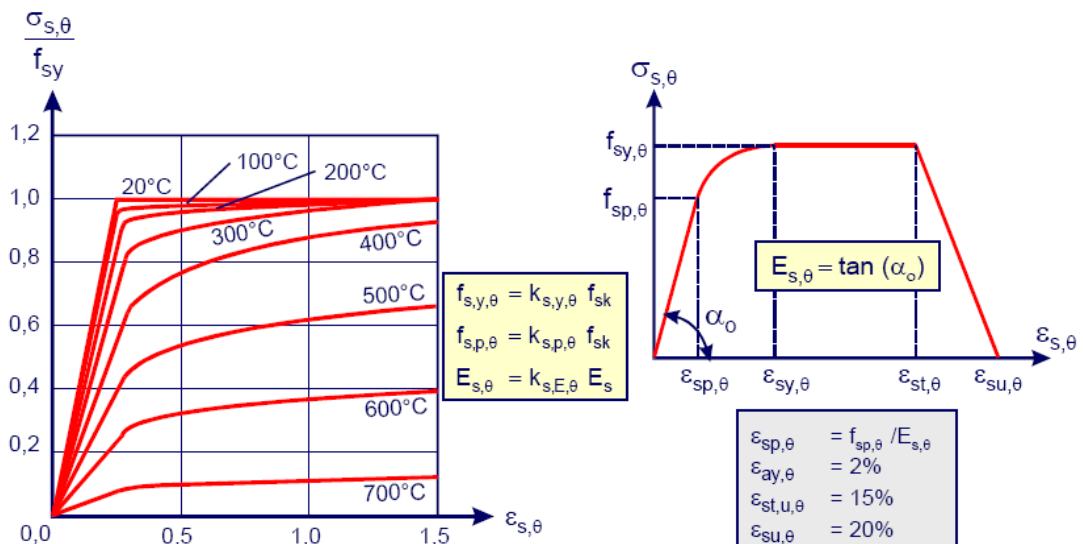


Рисунок – 1.9. Діаграми деформування попередньо ненапруженої арматурної сталі для різних температур її нагрівання [6]

Діаграми деформування відповідають значенням температур нагрівання. Схема їх будування для бетону показана на рис. 1.10. Їх можна показати у вигляді двухліїєних діаграм типу діаграм Прандтля без врахування спадної гілки або трьохліїєних діаграм із проміжною ділянкою. Відоме їхнє представлення разом із спадною ділянкою у вигляді кусочно-ліїєєних функцій, поліноміальних апроксимацій та раціонально-дробних функціоналів [6 – 20]. Зниження міцності бетону враховують, коли вводять спеціальні коефіцієнти роботи.

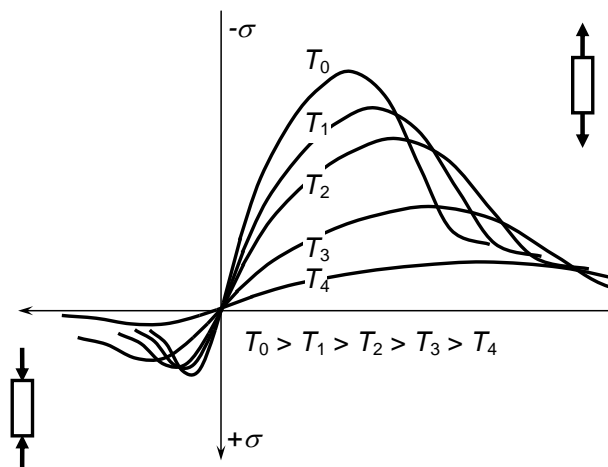


Рисунок – 1.10. Діаграми деформування бетону для різних температур [6]

Такий самий підхід використовують для аналітичного представлення для діаграм деформування арматурної сталі. Коли розглядають напружено-деформований стан залізобетону в умовах нагрівання вважають, що стискання та розтяг арматурної сталі відбувається за однаковими діаграмами.

Такий підхід був застосований у багатьох роботах [6 – 14, 51 – 55]. Аналітичні залежності діаграм деформування бетону та арматурної сталі для різних температур нагрівання, що отримані різними авторами представлені у табл. 1.3.

Таблиця 1.3. Математичне описання механічних властивостей бетону та арматурної сталі для проведення розрахунків на вогнестійкість

Аналітичне описання закону деформування бетону в умовах нагрівання при пожежі	Аналітичне описання закону деформування арматурної сталі в умовах нагрівання при пожежі	Посилання
<p>При $0 < \varepsilon_c < \varepsilon_{cu1}$, $\sigma_c = E_{c,\theta} \varepsilon_c$,</p> <p>При $\varepsilon_{cu1} < \varepsilon_c < \varepsilon_{cu}$ $\sigma_c = f_{c,\theta}$ (стиск),</p> <p>$\sigma_c = f_{ct,\theta}$ (розтягнення)</p>	<p>При $0 \leq \varepsilon_{st} \leq \varepsilon_{su1}$; $\sigma_{st} = E_{s,\theta} \varepsilon_{st}$, $\varepsilon_{su1} = f_{st,\theta} / E_{st,\theta}$</p> <p>При $\varepsilon_{su1} < \varepsilon_{st} \leq \varepsilon_{su}$; $\varepsilon_{st} = f_{sy,\theta}$; $\varepsilon_{su} = k_\varepsilon \varepsilon_{s,\theta}$</p>	[72]
<p>При $0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c1,\theta}$</p> $\sigma(\varepsilon) = \frac{3\varepsilon_c f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta} \left(2 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)},$ <p>При $\varepsilon_{c1,\theta} < \varepsilon_c < \varepsilon_{cu,\theta}$</p> $\sigma(\varepsilon) = f_{c,\theta} - \frac{f_{c,\theta} (\varepsilon_c - \varepsilon_{c1,\theta})}{\varepsilon_{cu,\theta} - \varepsilon_{c1,\theta}},$	<p>При $0 < \varepsilon_{st} < \varepsilon_{su1}$, $\sigma_s = E_{s,\theta} \varepsilon_{st}$</p> <p>При $\varepsilon_{su1} < \varepsilon_{st} \leq \varepsilon_{sy}$</p> $\sigma_s = f_{sp,\theta} - c + (b/a) [a^2 - (\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{st})^2]^{0,5},$ <p>При $\varepsilon_{sy} \leq \varepsilon_{st} \leq \varepsilon_{st}$ $\sigma_s = f_{s,\theta}$</p> <p>При $\varepsilon_{st} \leq \varepsilon_{st} \leq \varepsilon_{su}$</p> $\sigma_s = f_{s,\theta} [1 - (\varepsilon_{su} - \varepsilon_{st}) / (\varepsilon_{su0} - \varepsilon_{st})],$ <p>При $\varepsilon_{su} < \varepsilon_{st}$ $\sigma_s = 0$.</p>	[68]
$\sigma(\varepsilon) = f_{c,\theta} \cdot \left(a_1 \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cf\theta}} \right) + a_2 \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cf\theta}} \right)^2 + a_3 \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cf\theta}} \right)^3 + a_4 \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cf\theta}} \right)^4 + a_5 \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cf\theta}} \right)^5 \right);$ <p>$\varepsilon_{cf\theta} = K_{c\theta} \varepsilon_{cf}$; $f_{c,\theta} = \gamma_{ca} f_c$</p> $K_{c\theta} = 2 \cdot 10^{-8} \cdot \theta^3 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot \theta^2 + 0,003 \cdot \theta + 0,9119;$ $\varepsilon_{c\theta} = -8 \cdot 10^{-7} \theta^2 - 0,0006 \cdot \theta + 1,0213;$ $a_1 = 2,143; a_2 = -1,118; a_3 = -0,205;$ $a_4 = 0,217; a_5 = -0,023; \varepsilon_{cf} = 0,0018$	<p>Для арматури з фізичною межею текучості:</p> <p>при $0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s0}$ $\sigma_{st} = E_{st,\theta} \varepsilon_{st}$;</p> $\varepsilon_{s0} = f_{sy,\theta} / E_{st,\theta};$ <p>при $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2}$ $\sigma_{st} = f_{sy,\theta}$; $\varepsilon_{s2} = k_\varepsilon \varepsilon_{s0}$.</p> <p>Для арматури з умовною межею текучості:</p> <p>при $0 \leq \varepsilon_{st} \leq \varepsilon_{s1}$ $\sigma_{st} = E_{st,\theta} \varepsilon_{st}$;</p> $\varepsilon_{s1} = 0,8 f_{sy,\theta} / E_{st,\theta};$ <p>при $\varepsilon_{s1} < \varepsilon_{st} \leq \varepsilon_{s0}$ $\sigma_{st} = E_{s2,\theta} \varepsilon_{st}$;</p> $\varepsilon_{s0} = f_{sp,\theta} / E_{s2\theta} + 0,002;$ <p>при $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_{st} \leq \varepsilon_{s2}$ $\sigma_{st} = E_{s3,\theta} \varepsilon_{st}$; $\varepsilon_{s2} = k_\varepsilon \varepsilon_{s0}$;</p>	[47]

Продовження табл.1.3

Аналітичне описання закону деформування бетону в умовах нагрівання при пожежі	Аналітичне описання закону деформування арматурної сталі в умовах нагрівання при пожежі	Посилання
<p>При $0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c1}$ $\sigma_c = E_{c,\theta} \varepsilon_c$, $\varepsilon_{c1} = \frac{0,4 f_{c,\theta}}{E_{c,\theta}}$;</p> <p>при $\varepsilon_{c1} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c0}$ $\sigma_c = \left(2,2 \cdot -1,4 \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right)^2 + 0,2 \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right)^3 \right) R_{c,\theta}$</p> <p>$\varepsilon_{c0} = 0,002 \left(1 + 5 \left(\frac{\theta}{1000} \right)^{1,7} \right)$;</p> <p>при $\varepsilon_{c0} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}$ $\sigma_c = f_{c,\theta} - \frac{f_{c,\theta} - p}{\varepsilon_{c2} - \varepsilon_{c0}} \varepsilon_c$, $\varepsilon_{c2} = 1,6 \varepsilon_{c0}$</p> <p>$p = \frac{(\varepsilon_c / \varepsilon_{c0}) f_{c,\theta}}{1,8 (\varepsilon_c / \varepsilon_{c0}) - 1 + (\varepsilon_c / \varepsilon_{c0})}$.</p>	<p>При $0 \leq \varepsilon_{st} \leq \varepsilon_{s0}$ $\sigma_{st} = E_{st,\theta} \varepsilon_{st}$;</p> <p>$\varepsilon_{s0} = f_{sy,\theta} / E_{st,\theta}$;</p> <p>при $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_{st} \leq \varepsilon_{s2}$ $\sigma_{st} = f_{sy,\theta}$; $\varepsilon_{s2} = k_\varepsilon \varepsilon_{s0}$</p>	[68]
<p>при $0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c1}$ $\sigma_c = E_{c,\theta} \varepsilon_c$, $\varepsilon_{c1} = 0,6 \frac{f_{c,\theta}}{E_{c,\theta}}$;</p> <p>при $\varepsilon_{c1} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c0}$ $\sigma_c = 0,6 f_{c,\theta} + \frac{f_{c,\theta} (1 - 0,6)}{\varepsilon_{c0} - \varepsilon_{c1}} \varepsilon_c$,</p> <p>де ε_{c0} – табл. значення</p> <p>при $\varepsilon_{c0} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}$ $\sigma_c = f_{c,\theta}$, $\varepsilon_{c2} = 1,7 \varepsilon_{c0}$.</p>	<p>Для арматури з фізичною межею текучості:</p> <p>при $0 \leq \varepsilon_{st} \leq \varepsilon_{s0}$ $\sigma_{st} = E_{st,\theta} \varepsilon_{st}$;</p> <p>$\varepsilon_{s0} = f_{sy,\theta} / E_{st,\theta}$;</p> <p>при $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_{st} \leq \varepsilon_{s2}$ $\sigma_{st} = f_{st,\theta}$; $\varepsilon_{s2} = k_\varepsilon \varepsilon_{s0}$.</p> <p>Для арматури з умовною межею текучості: при $0 \leq \varepsilon_{st} \leq \varepsilon_{s1}$ $\sigma_{st} = E_{st,\theta} \varepsilon_{st}$;</p> <p>$\varepsilon_{s1} = 0,8 f_{sy,\theta} / E_{st,\theta}$;</p> <p>при $\varepsilon_{s1} < \varepsilon_{st} \leq \varepsilon_{s0}$ $\sigma_{st} = E_{s2,\theta} \varepsilon_{st}$;</p> <p>$\varepsilon_{s0} = f_{sy,\theta} / E_{s2,\theta} + 0,002$;</p> <p>при $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_{st} \leq \varepsilon_{s2}$ $\sigma_{st} = E_{s3,\theta} \varepsilon_{st}$;</p> <p>$\varepsilon_{s2} = k_\varepsilon \varepsilon_{s0}$;</p>	[47]

Міцність під час стискання і розтягування для бетону сильно відрізняється, як правило, на порядок. Тому під час розрахунку вважають, що бетон чинить опір тільки в момент стискання. В процесі розтягування бетон одразу руйнується і відповідні розтягуючі зусилля сприймаються арматурою [7 – 55].

Найбільш простим методом прогнозування роботи залізобетонних ригелів в умовах нагріву є метод аналогій. Результати, які отримані експериментальним або розрахунковим шляхом щодо поведінки ригелів та балок в умовах високотемпературного впливу із різними проєктними даними, узагальнюють у вигляді таблиць або номограм. Використовуючи означені проєктні дані, наприклад, клас міцності бетону й арматурної сталі, геометричні параметри перерізу, діючі навантаження, товщину захисного шару за відповідною таблицею обирається фактична межа, за якої досягається граничний стан за ознакою втрати несучої здатності. У стандартах [46, 47] наведена низка таблиць, що мають структуру, подібну до табл. 1.4, яка наведена як приклад [46, 47].

Більш точним є метод ізотерм, який полягає у розгляді напружено-деформованого стану, обмеженого ізотермою 500 °С з механічними характеристиками, що не зазнали змін. На основі цього підходу методика розрахунку опору поперечного перерізу залізобетонного ригеля або балки за умови високотемпературного впливу може бути виконана таким чином. Визначають конфігурацію ізотерми 500 °С у разі окремої теплової дії за стандартним температурним режимом або за параметричною вогневою дією. Потім визначають розрахункові ширину b_{fi} та висоту d_{fi} наведеного перерізу, відкинувши шар бетону за межами ізотерми 500 °С. Закруглені кути ізотерм можуть вважатись наближеними до прямокутної або квадратної форм, як показано на рис. 1.11.

Таблиця 1.4. Мінімальні розміри та відстань від осі арматури до обігрівних поверхонь вільно опертих балок, виготовлених із залізобетону та попередньо напруженого бетону

Станд. вогнест.	Мінімальні розміри						
	Можливі спол. a та b_{min} , де a – сер. відстань від осі арм. до обігр. поверхонь, а b_{min} – ширина балки				Товщина стінки балки b_w		
					Клас WA	Клас WB	Клас WC
R30	$b_{min}=80$ мм $a=25$ мм	120 мм 20 мм	160 мм 15 мм	200 мм 15 мм	80 мм	80 мм	80 мм
R60	$b_{min}=120$ мм $a=40$ мм	160 мм 35 мм	200 мм 30 мм	300 мм 25 мм	100 мм	80 мм	100 мм
R90	$b_{min}=150$ мм $a=50$ мм	200 мм 45 мм	300 мм 40 мм	400 мм 35 мм	110 мм	100 мм	100 мм
R120	$b_{min}=200$ мм $a=65$ мм	240 мм 60 мм	300 мм 55 мм	500 мм 50 мм	130 мм	120 мм	120 мм
R180	$b_{min}=240$ мм $a=80$ мм	300 мм 70 мм	400 мм 65 мм	600 мм 60 мм	150 мм	150 мм	140 мм
R240	$b_{min}=280$ мм $a=90$ мм	350 мм 80 мм	500 мм 75 мм	700 мм 70 мм	170 мм	170 мм	160 мм
$a_{sd} = a + 10$ мм скоригована осьова відстань							
Збільшення осьової відстані має робитися для попередньо напружених балок. Для величини b_{min} більшої за наданк в стовпчику 4 a коригувати не треба.							

Деякі з арматурних стрижнів можуть виходити за межі зразка поперечного перерізу як зображено на рис 1.7. Визначення температур арматурних стрижнів в розтягнутій або стисненій зонах проводиться із врахуванням таких стрижнів. Для визначення несучої здатності поперечного перерізу ригеля розраховується зменшена міцність арматури залежно від температури відповідно до діаграм на рис. 1.9.

На рис. 1.11 наведено основне правило розрахунку несучої здатності поперечного перерізу як із стиснутим так і з розтягнутим армуванням.

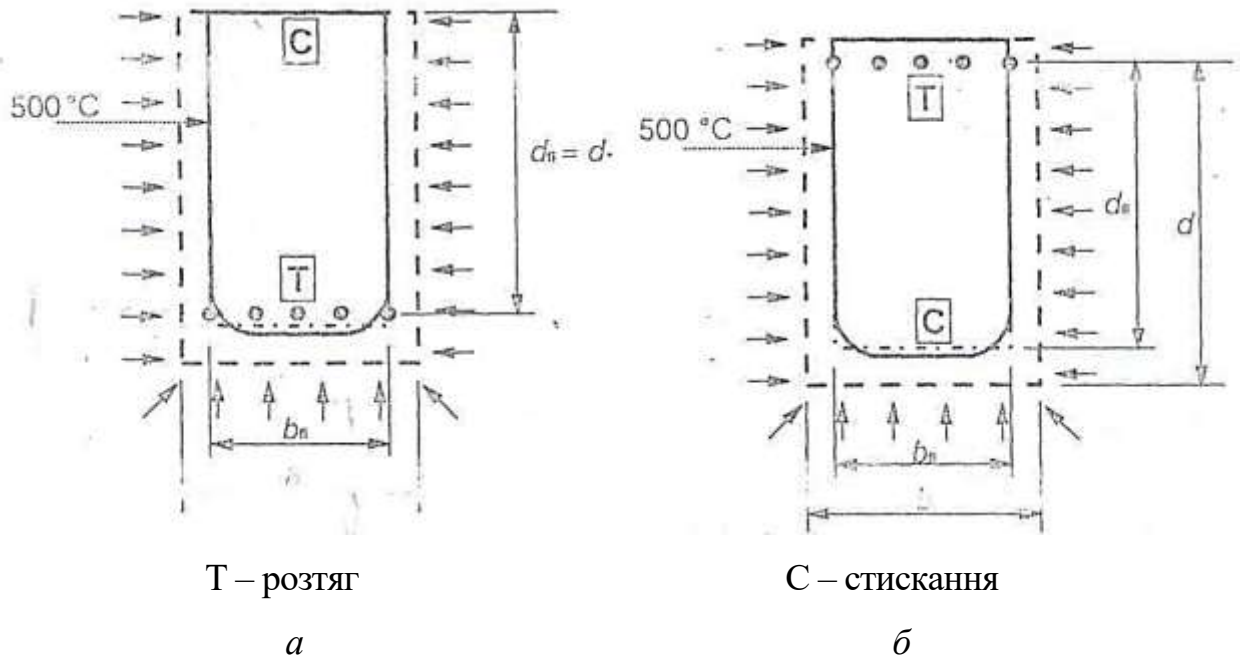


Рисунок – 1.11. Зразок поперечного перерізу залізобетонної балки або ригеля:
a – тристоронній тепловий вплив на розтягнуту зону; *б* – тристоронній
тепловий вплив на стиснуту зону [47]

Середню знижену міцність арматурного ряду залежно від підвищених температур розраховують за формулою [55]:

$$k_v(\theta) = \frac{\sum k(\theta_i)}{n_v}, \quad (1.3)$$

де: θ – температура нагрівання поточного арматурного стрижня з індексом i ;

$k(\theta_i)$ – коефіцієнт зниження міцності сталі внаслідок нагрівання поточного арматурного стрижня залежно від температури нагріву θ_i , що обчислена згідно із рис. 1.9;

$k_v(\theta)$ – середній коефіцієнт зменшення міцності сталі v -того арматурного ряду;

n_v – число арматурних стрижнів у поточному арматурному ряді.

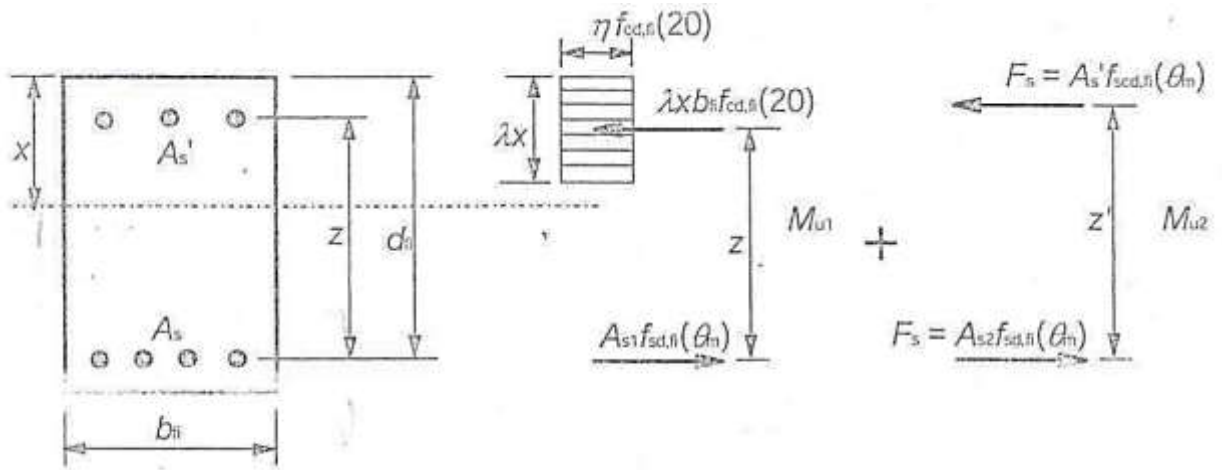


Рисунок – 1.12. Розподіл напружень у прямокутному перерізі зі стиснутим армуванням за критичної несучої здатності [47]

Відстань a від центру тяжіння арматурного ряду до нижньої поверхні розрахункового поперечного перерізу можна визначити за формулою:

$$a = \frac{\sum a_v k_v(\theta)}{\sum k_v(\theta)}, \quad (1.4)$$

де a_v – відстань від v -того арматурного ряду до нижньої поверхні розрахункового поперечного перерізу.

Якщо існують тільки два ряди, то відстань a від центру тяжіння арматурного ряду до нижньої поверхні розрахункового перерізу можна розрахувати за такою формулою:

$$a = \sqrt{(a_1 a_2)}. \quad (1.5)$$

Якщо арматурні стержні розміщені довільно та мають різні площі, використовують наступну методику.

Залежно від підвищених температур середній опір стрижнів сталі арматурної групи $k(\varphi) f_{sd,fi}$ може розраховуватись за виразом:

$$k(\varphi)f_{sd,fi} = \frac{\sum_i [k_s(\theta_i)f_{sd,i}A_i]}{\sum_i A_i}, \quad (1.6)$$

де: $k_s(\theta_i)$ – коефіцієнт зменшення міцності сталі поточного арматурного стрижня;

$f_{sd,i}$ – розрахункова міцність сталі поточного арматурного стрижня за нормальних умов;

A_i – площа поперечного перерізу поточного арматурного стрижня.

Відстань a від поперечного перерізу до центру тяжіння арматурної групи розраховують за формулою (1.7).

$$a = \frac{\sum_i [a_i k_s(\theta_i) f_{sd,i} A_i]}{\sum_i [k_s(\theta_i) f_{sd,i} A_i]}, \quad (1.7)$$

де a_i – відстань від осі i -того арматурного стрижня до розрахункового поперечного перерізу.

Розрахунок згинального моменту можна виконати за такими виразами:

$$M_{u1} = A_{s1} f_{sd,fi}(\theta_m) z, \quad (1.8)$$

$$\omega_k = \frac{A_{s1} f_{sd,fi}(\theta_m)}{b_{fi} d_{fi} f_{cd,fi}(20)}, \quad (1.9)$$

$$M_{u2} = A_{s2} f_{scd,fi}(\theta_m) z', \quad (1.10)$$

$$A_s = A_{s1} + A_{s2}, \quad (1.11)$$

де: z' – відстань від стиснутого армування до розтягнутого армування;

$f_{sd,fi}$ – розрахунковий опір армування на розтяг;

ω_k – коефіцієнт міцності армування поперечного перерізу за умови високотемпературного впливу;

b_{fi} – ширина приведенного поперечного перерізу за умови високих температур;

z – відстань між розтягнутими арматурними стрижнями;

A_s – загальна площа армування;

d_{fi} – робоча висота зразка поперечного перерізу за умови високих температур;

$f_{cd,fi}(20)$ – розрахунковий опір бетону на стиск;

$f_{scd,fi}$ – розрахунковий опір арматури на стиск;

θ_m – середня температура арматурного ряду.

Коли вплив моменту оцінювати як показано вище, повну здатність чинити опір моменту визначають за формулою, наведеною нижче:

$$M_u = M_{u1} + M_{u2}. \quad (1.12)$$

Потім отримане значення порівнюють із моментом, який діє у ригелі згідно з розрахунками. Якщо розрахункове значення моменту більше, то граничний стан за ознакою втрати несучої здатності не досягається.

Більш точним вважають зонний метод. За його застосування поперечний переріз ділять на декілька ($n \geq 3$) паралельних зон. Зони це прямокутні елементи однакової товщини, де враховують відповідний середній опір на стиск $f_{cd}(\theta)$, середню температуру та модуль пружності (якщо застосовують) кожної зони. Пошкоджений впливом високих температурах поперечний переріз, що представлений наведеним поперечним перерізом не враховує товщини пошкодженої зони a_z обігрівних поверхонь (див. рис. 1.13). Приведення поперечного перерізу засновано на товщині a_z пошкодженої зони обігрівної поверхні. Пошкоджену зону a_z еквівалентного перерізу балки за умови трьохстороннього теплового впливу розраховують наступним чином.

Половину перерізу ділять на n паралельних зон (див. рис. 1.10), розраховують температуру для середини кожної зони, а після визначається коефіцієнт зниження опору на стиск $k_c(\theta_i)$.

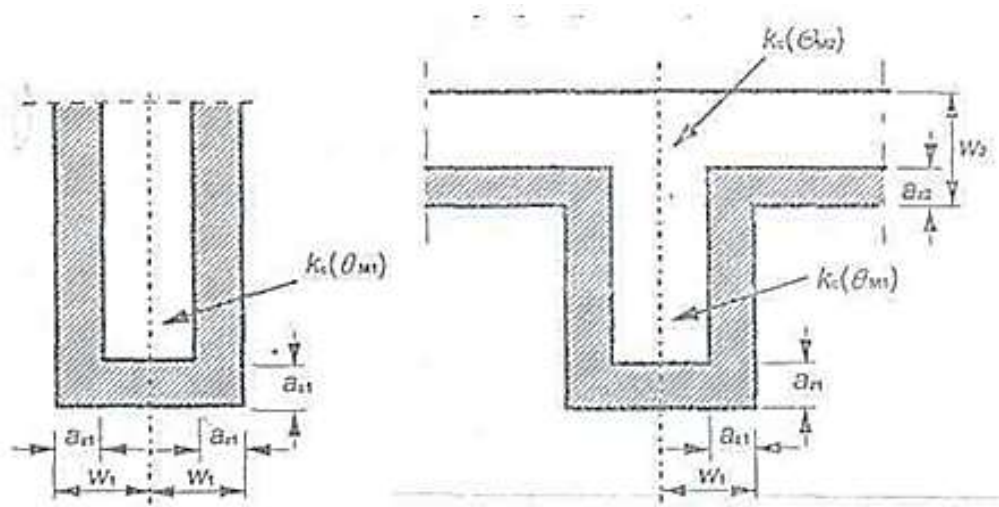


Рисунок – 1.13. Зниження міцності та приведення поперечного перерізу для частин під тепловим впливом [47]

Середній коефіцієнт зниження для визначеної частини, враховує зміну температури кожної зони та визначається за такою формулою:

$$k_{c,m} = \frac{(1 - 0,2/n)}{n} \sum_{i=1}^n k_c(\theta_i), \quad (1.13)$$

де: n – число зон, паралельних ширині поперечного перерізу w ;

w – повна ширина, поділена на два;

m – число зон.

Ширину пошкодженої зони балок в розрізі плану можна розрахувати за формулою:

$$a_z = w \left[1 - \frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right], \quad (1.14)$$

де $k_c(\theta_M)$ – коефіцієнт зниження міцності бетону в точці M .

Коли наведений поперечний переріз знайдено, а модуль пружності та міцність визначені, розрахункове прогнозування роботи залізобетонних ригелів при дії високих температур виконують за розрахунковою методикою розрахунку за умови нормальних температур подібно до тієї, що зображена на рис. 1.12 із використанням значень $\gamma_{M,fl}$.

1.5. Висновки до розділу та основні завдання дослідження

Проведений аналіз існуючих методів сучасного стану щодо нормування та методів прогнозування поведінки залізобетонних будівельних конструкцій в умовах пожежі дозволив сформулювати висновки.

1. Експериментальні методи прогнозування роботи залізобетонних ригелів та балок не мають чіткого обґрунтування, оскільки навантажувальна і опорна система силових вузлів установок для випробувань не здатні реалізувати діючі навантаження і умови закріплення ригелів. Також випробувальні установки встановлюють обмеження на габаритні розміри зразків ригелів. Результати випробувань цих зразків поширюються на реальні конструкції не враховуючи, можливої похибки, яка зумовлена цією невідповідністю.

2. Розрахункові методи засновані на різних математичних моделях, серед яких знаходяться моделі, що враховують всі особливості поведінки залізобетону в умовах термосилового впливу пожежі, але отримані результати розрахунку потребують ретельної перевірки, оскільки у якості початкових даних використовується набір властивостей компонентів залізобетону, що можуть істотно відрізнятись у межах одного класу матеріалу.

3. Для визначення несучої здатності залізобетонних ригелів та балок під час пожежі запропоновано застосовувати метод вогневих випробувань

і математичну обробку отриманих результатів. Проведення вогневих випробувань зразків, які за габаритними розмірами наближаються до реальних елементів конструкцій забезпечує високу достовірність результатів, а застосування розрахунку надає гнучкість при врахуванні граничних умов для залізобетонних елементів даного типу.

Отримані висновки дозволяють сформулювати основні завдання дослідження.

1. Виконати аналіз сучасного стану щодо нормування та методів оцінювання вогнестійкості залізобетонних ригелів та балок в Україні і шляхів удосконалення методів, що базуються на розрахунковому підході.

2. Розробити метод інтерполяції температурних розподілень у перерізі залізобетонних ригелів за точковими вимірюваннями температури під час вогневих випробувань та на його основі розробити метод ідентифікації коефіцієнтів зниження міцності бетону залізобетонних балок та ригелів.

3. Обґрунтувати методику та виконати за її використанням вогневі випробування залізобетонних ригелів, на основі яких виконати інтерполяцію температурних розподілень.

4. За визначеними температурними розподіленнями виконати ідентифікацію коефіцієнтів зниження міцності бетону залізобетонних ригелів, який піддають вогневим випробуванням.

5. Дослідити адекватність результатів, отриманих за запропонованим методом ідентифікації коефіцієнтів зниження міцності бетону за даними вимірювань в умовах вогневих випробувань залізобетонних ригелів і визначити умови, за яких можливо досягти їхню найбільшу точність.

6. Розробити удосконалений метод розрахунку на вогнестійкість залізобетонних ригелів та балок, для яких отримані дані щодо зниження міцності бетону є частиною комплексу початкових даних.

РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ТА РИГЕЛІВ В УМОВАХ ТЕПЛОВОГО ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ

Одним з основних завдань роботи є обґрунтування методу ідентифікації механічних властивостей бетону для підвищення точності методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів. На початковому етапі треба визначити поведінку залізобетонного ригеля та балки під час їхнього нагрівання за стандартним температурним режимом пожежі, механічні властивості бетону якого являються частиною початкових даних і чітко встановлені за рекомендаціями другої частини Єврокода 2 EN 1992-1-2: 2012 [47]. Після цього за розробленим методом ідентифікувати ці механічні характеристики бетону і встановити їх адекватність шляхом порівняння із попередньо заданими. Для цього було розроблено таку послідовність розрахункових процедур.

1. Створити математичну модель залізобетонної балки з перерізом 150×300 мм та довжиною 1.7 м, подібно до серії експериментів, що описані у роботах [84, 85].

2. Із використанням створеної моделі виконати чисельний експеримент, в процесі якого визначити температурні розподілення у перерізі залізобетонної балки та її переміщення за умов нагрівання під тепловим впливом стандартного режиму пожежі.

3. Для визначення температур у будь-якій точці перерізів залізобетонних ригелів та балок за точковими вимірюваннями температури у їхніх внутрішніх шарах в процесі вогневих випробувань розробити відповідний метод інтерполяції і встановити адекватність результатів, що отримані за умови його застосування.

4. З використанням отриманих температурних розподілів розробити метод ідентифікації механічних характеристик бетону на основі рівнянь

рівноваги, що побудовані з використанням деформаційної моделі балки, що описана у роботах [64 – 74, 84].

2.1. Математична модель залізобетонної балки

Для дослідження поведінки залізобетонної балки в умовах впливу температури за умов стандартного температурного режиму пожежі розглядаємо ригель, конструктивна схема якого наведена на рис. 2.1.

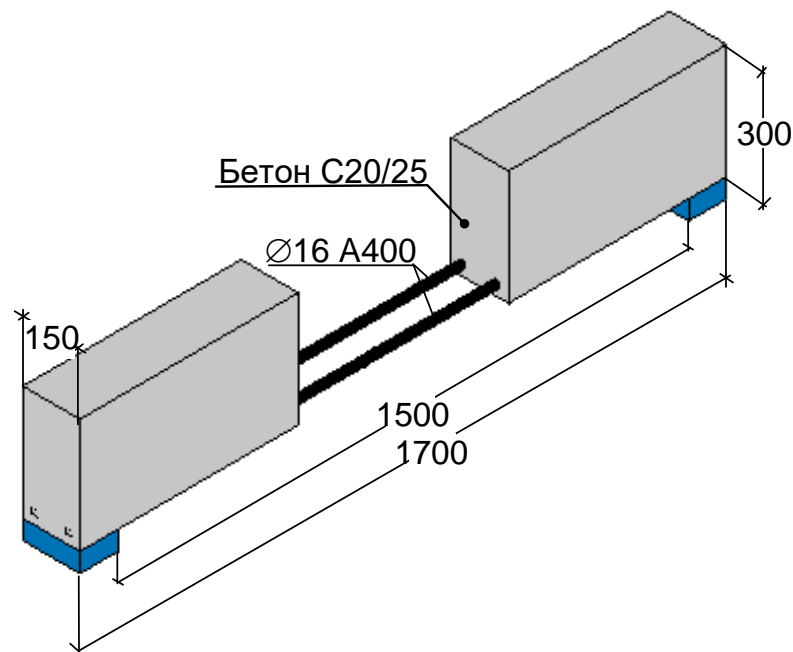


Рисунок – 2.1. Конструктивна схема залізобетонної балки для досліджень її поведінки в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі

2.1.1. Математична модель теплопередачі у перерізі залізобетонної балки під тепловим впливом стандартного режиму пожежі

З метою виконання теплового розрахунку залізобетонної балки в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі, був використаний базовий інженерний підхід, що має положення,

рекомендовані у роботах [72, 73, 86 – 90]. Прийняті положення викладені нижче.

1. Тепловий розрахунок здійснено з використанням диференціального нестационарного рівняння теплопровідності у квазілінійному записі із врахуванням конвекційного і радіаційного теплообміну на границях розрахункової області із середовищем пожежі за граничними умовами (ГУ) III роду.

2. Температурний режим у середовищі приміщення із пожежею описано стандартною температурною кривою пожежі.

3. На підставі того, що між теплопровідностями бетону та арматурної сталі існує велика різниця, процес теплопередачі розглянуто тільки в бетоні.

4. Теплофізичні характеристики (ТФХ) бетону відповідають температурним залежностям згідно з рекомендацій Єврокода 2 EN 1992-1-2: 2012 [46, 47].

5. Рівняння теплопровідності апроксимовано за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) із залученням для цього комп'ютерної системи ANSYS APDL.

Нестационарне диференціальне рівняння теплопровідності у квазілінійному записі має такий вигляд [84 – 96]:

$$c_p(\theta)\rho(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial t} = \nabla(\lambda(\theta)\nabla\theta), \quad (2.1)$$

де: $\rho(\theta)$ – густина бетону;

$c_p(\theta)$ – питома теплоємність бетону, залежна від температури θ ,

$\lambda(\theta)$ – коефіцієнт теплопровідності бетону, залежний від температури θ .

Граничні умови III роду, що враховують теплообмін на границях, записують у вигляді [84 – 93]:

$$-\lambda(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial r} = \alpha(\theta_P - \theta_W), \quad (2.2)$$

де: θ_P – температура у приміщенні із пожежею;

θ_W – температура поверхні ригеля;

α – коефіцієнт теплообміну.

Коефіцієнт теплообміну має враховувати процеси конвекції та теплового випромінювання. За обраного інженерного підходу, коефіцієнт теплообміну визначено як:

$$\alpha = \alpha_P + \alpha_K, \quad (2.3)$$

де α_P – коефіцієнт променистого теплообміну.

Відповідно до рекомендацій [47, 55] складові конвекції й променистого теплообміну можна обчислити за виразами:

$\alpha_K = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – теплообмін на обігрівній поверхні;

$\alpha = 9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – теплообмін на необігрівній поверхні.

$$\alpha_P = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{\theta_W^4 - \theta_P^4}{\theta_W - \theta_P}, \quad (2.4)$$

де: $\varepsilon = 0.7$ – ступінь чорноти поверхні бетону [47];

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

Для теплового розрахунку залізобетонної балки були взяті ТФХ бетону відповідно до рекомендацій другої частини Єврокода 2 EN 1992-1-2: 2012 [47]. У цій настанові рекомендовано брати для бетону температурні залежності питомої теплоємності та коефіцієнта теплопровідності за рівняннями, що надані у табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Теплофізичні властивості бетону

Теплопровідність, $\lambda(\theta)$, Вт/(м·°С)	Питома теплоємність, $c_p(\theta)$, Дж/(кг·°С)	Густи- на, кг/м ³
Звичайний бетон із гранітним крупним заповнювачем за ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 Єврокод 2.		
$2 - 0.2451 \frac{\theta}{100} + 0.0107 \left(\frac{\theta}{100} \right)^2$	900· при 0 °С < θ < 100 °С, 900 + ($\theta - 100$) при 100 °С ≤ θ < 200 °С, 1000 + ½($\theta - 100$) при 200 °С ≤ θ < 400 °С, 1100 при 400 °С ≤ θ < 1200 °С	2300

На рис. 2.2. показані температурні криві теплофізичних характеристик бетону.

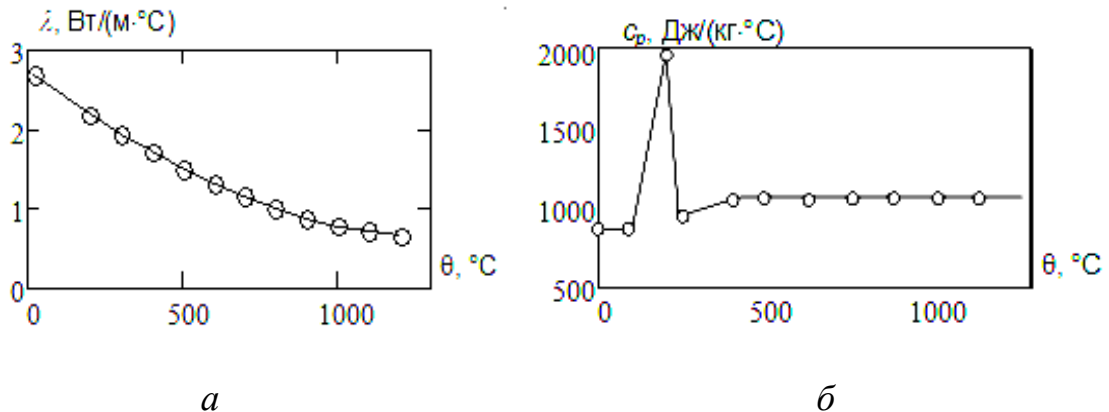


Рисунок – 2.2. Теплофізичні характеристики бетону залізобетонної балки:

a – коефіцієнт теплопровідності; *б* – питома теплоємність

Числові характеристики граничних умов розрахункової області залізобетонної балки подані у табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Параметри граничних умов для залізобетонної балки

Параметр граничних умов	Одиниці вимірювання	Значе- ння	Джерело
Коефіцієнт теплообміну конвекцією обігрівної сторони α_c	Вт/(м ² ·°С)	25	[48]
Ступінь чорноти ε		0,7	[47]
Коефіцієнт теплообміну необігрівної сторони α_c	Вт/(м ² ·°С)	9	[48]

Числові дані вказаних характеристик встановлено з врахуванням рекомендацій других частин Єврокода 2 EN 1992-1-2: 2012 та EN 1991-1-2:2010 Єврокод 1 [47 – 48].

2.1.2. Розрахункові схеми залізобетонної балки для теплового розрахунку

Для виконання теплового розрахунку залізобетонної балки в умовах стандартного температурного режиму пожежі достатньо розглянути теплообмін у його перерізі. Таким чином знижується розмірність геометричної схеми, і рівняння (2.1) записуємо у двомірному вигляді.

Розрахункова схема перерізу залізобетонної балки зображена на рис. 2.3.

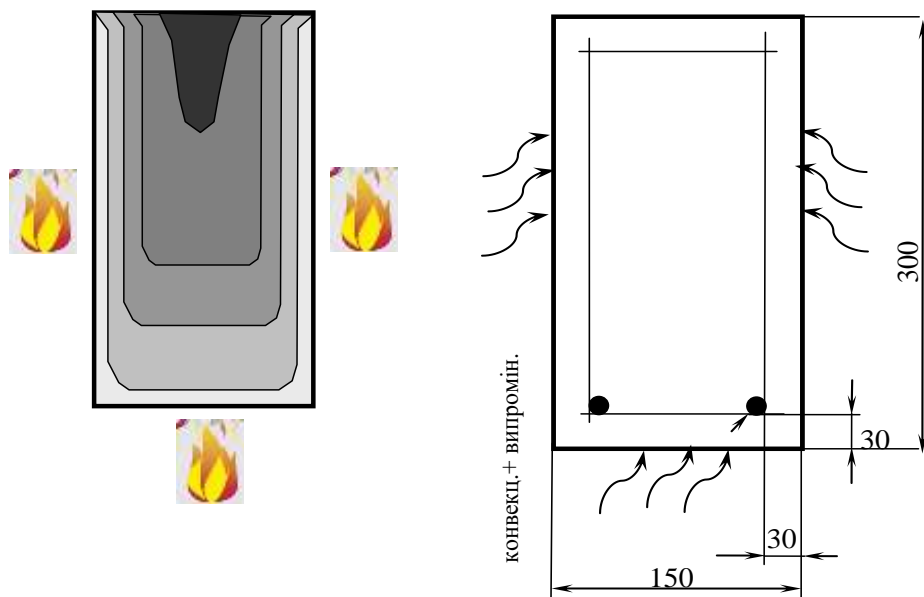


Рисунок – 2.3. Розрахункова схема до теплового розрахунку залізобетонної балки

Для розв'язання теплової задачі з використанням МСЕ був застосований гексаедричний скінченний елемент лагранжевого типу [47], геометрична форма якого показано на рис. 2.4.

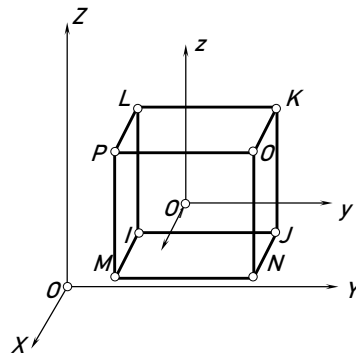


Рисунок – 2.4. Геометрична форма скінченного елемента, що використовується для розрахунку [47]

Для інтерполяції використовують поліноми Лагранжа, які мають форму виразів [20, 53, 74, 85]:

$$p_x = \frac{1}{8}(p_{Lx}(1-x)(1-y)(1-z) + p_{Kx}(1-x)(1-y)(1-z) + \dots + p_{Ix}(1-x)(1-y)(1-z));$$

$$p_y = \frac{1}{8}(p_{Ly}(1-x)(1-y)(1-z) + p_{Ky}(1-x)(1-y)(1-z) + \dots + p_{Iy}(1-x)(1-y)(1-z));$$

$$p_z = \frac{1}{8}(p_{Lz}(1-x)(1-y)(1-z) + p_{Kz}(1-x)(1-y)(1-z) + \dots + p_{Iz}(1-x)(1-y)(1-z)). \quad (2.5)$$

Скінченно-елементна схема залізобетонної балки у відповідності до рис. 2.1 та рис. 2.3 зображена на рис. 2.5.

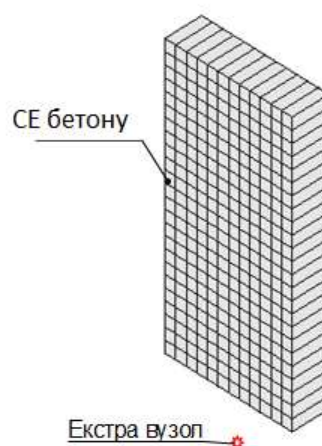


Рисунок – 2.5. Скінченно-елементна схема залізобетонної балки для теплового розрахунку

На рис. 2.5 показана скінченно-елементна схема залізобетонної балки, яка складається з об'ємних скінченних елементів. Незважаючи на це, помітно, що вони розташовані у один шар. Це означає, що задача є аналогічною двовимірній задачі теплопровідності. Для надання променистого компоненту граничних умов III роду вводиться екстравузол, який встановлює температуру у приміщенні із пожежею.

У відповідності з попереднім пунктом даної роботи до скінченно-елементної схеми залізобетонної балки була сформульована крайова задача із прикладеними ГУ. Схема прикладання основних компонентів наведена на рис. 2.6.

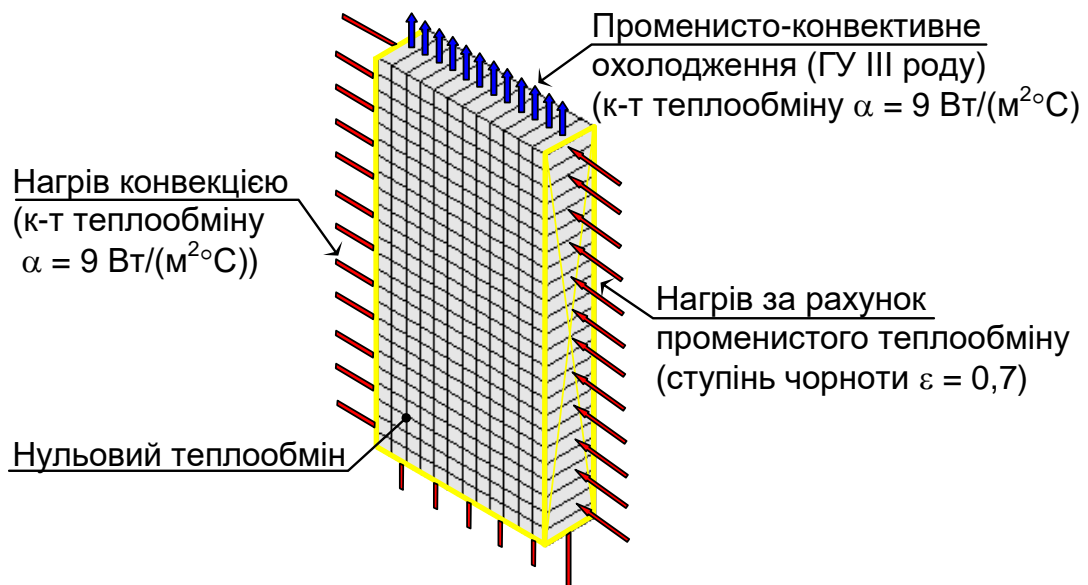


Рисунок – 2.6. Розрахункова схема прикладення граничних умов до компонентів скінченно-елементної схеми для залізобетонної балки

2.1.3. Результати розв'язання теплової задачі

Після розрахунків було отримано температурні дані у внутрішніх шарах залізобетонної балки. На рис. 2.7 зображено температурний розподіл по перерізу балки у різні моменти часу.

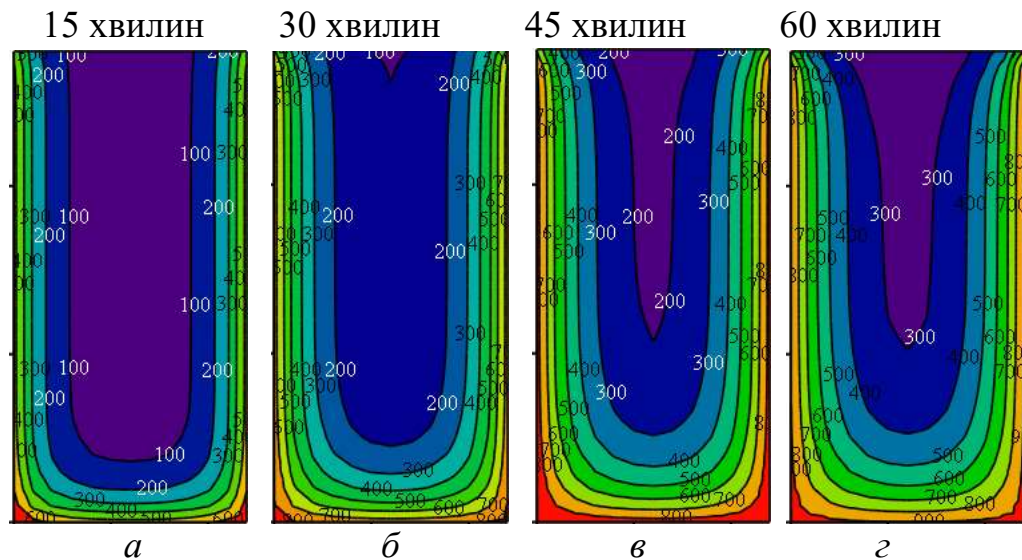


Рисунок – 2.7. Температурний розподіл по перерізу балки у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі (°C):

а – 15 хв; *б* – 30 хв; *в* – 45 хв; *г* – 60 хв

Таким чином, отримані результати можуть доповнити комплекс початкових даних для математичного моделювання поведінки досліджуваного залізобетонної балки в умовах його нагрівання під тепловим впливом стандартного режиму пожежі.

2.1.4. Математична модель напружено-деформованого стану у перерізі залізобетонної балки в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі

Для моделювання напружено-деформованого стану у залізобетонній балці використано узагальнений інженерний підхід, який заснований на положеннях, зазначених нижче.

1. Для розрахунку використано систему диференціальних рівнянь напружено-деформованого твердого тіла, яка апроксимується із застосуванням метода скінченних елементів.

2. Механічні характеристики бетону та арматурної сталі є залежними від поточних величин деформацій і температури за нелінійними законами, а також враховано великі переміщення елементів конструкцій, які можуть бути порівняні з їхніми габаритними розмірами.

3. Для відтворення теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі використано температурні дані, отримані під час попередньо виконаного теплового розрахунку.

4. Система диференціальних рівнянь напружено-деформованого стану розв'язана числовим способом з використанням методу скінченних елементів з реалізацією нелінійного розрахунку за методом Ньютона-Рафсона, суть якої полягає у покроковому додаванні діючого механічного навантаження на початку розрахунку та покрокового додавання температурних навантажень на кінцевому етапі з часовим кроком 1 хв.

5. Для моделювання напружено-деформованого стану у залізобетонній балці під впливом стандартного температурного режиму пожежі враховано деформаційні діаграми бетону та арматурної сталі із спадною гілкою.

6. Утворення пошкоджень у бетоні та виникнення пластичних деформацій визначається прийнятою теорією міцності бетону та теорією пластичності сталі.

7. Ознаками, за якими встановлюється наявність глобального руйнування залізобетонної балки чи ригеля є:

- виникнення сингулярності під час обчислювального процесу у разі порушення геометричної незмінності механічної системи;
- досягнення граничних пластичних деформацій в точках інтегрування скінченних елементах сіткової моделі залізобетонної балки чи ригеля;
- досягнення граничних значень максимального прогину залізобетонної балки чи ригеля;

- досягнення граничних значень швидкості зростання максимального прогину залізобетонної балки чи ригеля.

Описаний підхід до математичного моделювання напружено-деформованого стану залізобетонної балки чи ригеля в умовах стандартного температурного режиму пожежі полягає у розгляданні тривимірної розрахункової області. Водночас застосовано систему диференціальних рівнянь напружено-деформованого стану твердого тіла у часткових похідних [20, 53, 74, 85].

У цьому випадку в системі рівнянь напружено-деформованого стану має бути рівняння рівноваги елементарного об'єму, вигляд якого у матричній формі поданий нижче [20, 53, 74, 85]:

$$\mathbf{D}^T \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{p} = 0. \quad (2.6)$$

Крім цього, у системі диференціальних рівнянь напружено-деформованого стану записано рівняння приведення вектора довільних напружень у елементарному об'єму до напружень, які розташовані на нормальній площині елементарного об'єму, у зв'язку із граничними умовами на граничній поверхні розрахункової області у вигляді:

$$\mathbf{q} = \mathbf{T}_n^T \boldsymbol{\sigma}, \mathbf{q}|_{S_q} = \bar{\mathbf{q}}. \quad (2.7)$$

У системі диференціальних рівнянь напружено-деформованого стану має бути ще одне рівняння у матричній формі, яке називається кінематичним рівнянням збігання деформацій з величинами параметрів граничних умов на граничній поверхні елементарного об'єму тіла, його записано у вигляді:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D}\mathbf{u} + \boldsymbol{\varepsilon}_t, \mathbf{u}|_{S_u} = \bar{\mathbf{u}}. \quad (2.8)$$

Останнє рівняння у системі встановлює зв'язок між векторами напружень та векторами деформацій, його називають рівнянням стану і записано у вигляді:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E}(\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\varepsilon}_t) + \boldsymbol{\sigma}_0. \quad (2.9)$$

Записані вище рівняння системи напружено-деформованого стану твердого тіла мають такі компоненти:

$$\mathbf{D}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad - \quad \text{матричний диференціальний}$$

оператор;

$\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx})^T$ – вектор величин тензора напружень;

$\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \gamma_{xy} \gamma_{yz} \gamma_{zx})^T$ – вектор величин тензора деформацій;

$\boldsymbol{\varepsilon}_t = (\alpha_t \Delta \theta \alpha_t \Delta \theta \alpha_t \Delta \theta 0 0 0)^T$ – вектор температурних деформацій;

\mathbf{E} – матриця коефіцієнтів пружності;

$\mathbf{p} = (X Y Z)^T$ – вектор об'ємних сил;

$$\mathbf{T}_n^T = \begin{bmatrix} n_x & 0 & 0 & n_y & 0 & n_z \\ 0 & n_y & 0 & n_x & n_z & 0 \\ 0 & 0 & n_z & 0 & n_y & n_x \end{bmatrix} \quad - \quad \text{матриця направляючих косинусів;}$$

$\boldsymbol{\sigma}_0$ – вектор діючих напружень за умови навантажень відповідно до розрахункової схеми конструкції.

Записані вище диференціальні рівняння напружено-деформованого стану твердого тіла для розв'язку задачі міцності мають бути доповнені з огляду на спосіб їхнього числового розв'язання та підходи щодо моделювання напружено-деформованого стану залізобетону з урахуванням появи тріщин та пластичних деформацій. У табл. 2.3 записані основні математичні моделі напружено-деформованого стану залізобетону [20, 54].

Таблиця 2.3. Моделі напружено-деформованого стану у залізобетонній балці та ригелі

Процес за умови теплового та механічного впливу	Математична модель	Автор
Деформування залізобетону	Базові рівняння напружено-деформованого стану апроксимовані за методом скінченних елементів	
Пластичне деформування бетону та арматури	Багатошарова модель асоційованої теорії пластичної течії (кінетичне зміцнення)	Besseling
Тріщиноутворення	Складальний критерій міцності бетону	Willem, Warnke
Фізична та геометрична нелінійність	Ітеративний метод	Newton, Raphson
Механічні властивості бетону та арматури за умови нагрівання	Єврокод 2 EN 1992-1-2: 2012	

Для описання напружено-деформованого стану у залізобетонному ригелі чи балці за умов теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі були розглянуті основні технічні параметри, які надані у табл. 2.4.

Таблиця 2.4. Основні технічні характеристики залізобетонної балки та ригеля

Властивості бетону	Позначка	Величина	Од. виміру
Тип бетону	Звичайний на заповнювачі з граніту	Клас міцн. C 20/25 (B25)	
Густина	ρ_B	2300	кг/м ³
Вологість	u	< 3	%
Робоча арматура: діаметр	d_1	Клас міцн. A400C 0.016	м

З метою визначення умови нелінійної задачі міцності для механічних властивостей бетону та арматурної сталі застосовано рекомендації другої частини Єврокода 2 EN 1992-1-2: 2012 [47].

Для компонентів залізобетону балок та ригелів їхні механічні характеристики подані у табл. 2.5.

Таблиця 2.5. Механічні характеристики компонентів залізобетону балок та ригелів

Матеріал	Міцність, МПа	Модуль пружності, МПа	Коеф. Пуассона
Бетон	20	$1,4 \cdot 10^4$ (початковий)	0,2
Робоча арматура	400	$2,1 \cdot 10^5$	0,3

Застосовуючи рекомендації другої частини Єврокода 2 EN 1992-1-2: 2012 [47], температурні залежності механічних властивостей бетону записуються з використанням нижче вказаних рівнянь.

Зниження міцності бетону залежно від показників його нагрівання визначено за формулою:

$$f_{ck,t}(\theta) = k_{c,t}(\theta) f_{ck,t}, \quad (2.10)$$

де $k_{c,t}(\theta)$ – коефіцієнт зниження міцності бетону на стискання залежно від температури його нагрівання.

При врахуванні нелінійного розрахунку деформування залізобетону застосовано діаграму деформування бетону, яку описують формулами [47]:

$$\text{при } 0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c1,\theta} \quad \sigma(\varepsilon_c) = \frac{3\varepsilon_c f_{ck,t}(\theta)}{\varepsilon_{c1,\theta} \left(2 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)}, \quad (2.11)$$

$$\text{при } \varepsilon_{c1,\theta} < \varepsilon_c < \varepsilon_{cu1,\theta}, \sigma(\varepsilon_c) = f_{ck,t}(\theta) \left(1 - \frac{(\varepsilon_c - \varepsilon_{c1,T})}{\varepsilon_{cu1,t} - \varepsilon_{c1,T}} \right),$$

де: ε_c – величина відносної деформації;

$\varepsilon_{c1,\theta}$ – величина граничної відносної деформації, до кінця зростаючої ділянки діаграми деформування бетону;

$\varepsilon_{cu1,\theta}$ – величина граничної деформації бетону.

Параметри формул (2.11) визначено за табл. 2.6.

Таблиця 2.6. Значення параметрів для будування діаграми деформації бетону за умови підвищених температур

Температура бетону, θ , °C	Коефіцієнт зниження міцності, $k_{c,t}(\theta)$	Гранична деформація висхідної гілки, $\varepsilon_{c1,\theta}$	Гранична деформація, $\varepsilon_{cu1,\theta}$
20.0	1.000	$0.25 \cdot 10^{-2}$	$2.00 \cdot 10^{-2}$
100.0	1.000	$0.40 \cdot 10^{-2}$	$2.25 \cdot 10^{-2}$
200.0	0.950	$0.55 \cdot 10^{-2}$	$2.50 \cdot 10^{-2}$
300.0	0.850	$0.70 \cdot 10^{-2}$	$2.75 \cdot 10^{-2}$
400.0	0.750	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$3.00 \cdot 10^{-2}$
500.0	0.600	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$3.25 \cdot 10^{-2}$
600.0	0.450	$2.50 \cdot 10^{-2}$	$3.50 \cdot 10^{-2}$
700.0	0.300	$2.50 \cdot 10^{-2}$	$3.75 \cdot 10^{-2}$
800.0	0.150	$2.50 \cdot 10^{-2}$	$4.00 \cdot 10^{-2}$
900.0	0.080	$2.50 \cdot 10^{-2}$	$4.25 \cdot 10^{-2}$
1000.0	0.04	$2.50 \cdot 10^{-2}$	$4.50 \cdot 10^{-2}$
1100.0	0.010	$2.50 \cdot 10^{-2}$	$4.75 \cdot 10^{-2}$
1200.0	0.000	-	-

Для завдання умов зниження міцності арматурної сталі в умовах її нагрівання її знижену міцність визначено за формулою:

$$f_{sy,t}(\theta) = k_s(\theta) f_{yk,t}, \quad (2.12)$$

де $k_s(\theta)$ – коефіцієнт зниження міцності арматурної сталі залежно від температури.

Діаграмм деформування арматурної сталі розраховуються за такими формулами:

$$\begin{aligned}
 \text{якщо } 0 \leq \varepsilon_s < \varepsilon_{s0} & \quad \sigma_s = E_{s,\theta} \varepsilon_s \\
 \text{якщо } \varepsilon_{s0} \leq \varepsilon_s < \varepsilon_{sy} & \quad \left(f_{ap,\theta} - c \right) + \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta} \right)^2}, \\
 \text{якщо } \varepsilon_{sy} \leq \varepsilon_s < \varepsilon_{st} & \quad \sigma_s = f_{sy,\theta} \\
 \text{якщо } \varepsilon_{st} \leq \varepsilon_s < \varepsilon_{s2} & \quad \sigma_s = f_{sy,\theta} - f_{sy,\theta} (\varepsilon_s - \varepsilon_{st}) / (\varepsilon_{s0} - \varepsilon_{st}), \\
 \text{якщо } \varepsilon_{s2} \leq \varepsilon_s & \quad \sigma_s = 0,
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

де a, b, c – параметри, які розраховуються за формулами:

$$\begin{aligned}
 a^2 &= \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta} \right) \cdot \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta} + c / E_{a,\theta} \right), \\
 b^2 &= c \left((\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp}) E_{s,\theta} + c \right), \quad E_{s,\theta} = \frac{b \cdot \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta} \right)}{a \sqrt{a^2 - \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta} \right)^2}} \\
 c &= \frac{\left(f_{ay,\theta} - f_{ap,\theta} \right)^2}{E_{a,\theta} \cdot \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta} \right) - 2 \cdot \left(f_{ay,\theta} - f_{ap,\theta} \right)},
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

де: $f_{sp,\theta}$ – границя пропорційності сталі;

ε_{st} – деформація, за якої починається спадна ділянка діаграми;

ε_{sy} – деформація, за якої настає межа текучості;

$E_{s,\theta}$ – модуль пружності сталі, що залежний від температури нагрівання.

Всі параметри, що визначають закони деформування арматурної сталі у вигляді формул (2.13) та (2.14), можна визначити за даними табл. 2.7.

Таблиця 2.7. Величини параметрів залежностей напружень від деформації арматурної сталі залізобетонного ригеля за умови підвищених температур

Температура сталі $\theta, ^\circ\text{C}$	Зниження межі пропорційності, $f_{sy,\theta}/f_{yk}$	Зниження межі міцності, $f_{sp,\theta}/f_{yk}$	Зниження модуля пружності, $E_{s,\theta}/E_s$
20.0	1.000	1.000	1.000
100.0	1.000	1.000	1.000
200.0	1.000	0.810	0.900
300.0	1.000	0.610	0.800
400.0	1.000	0.420	0.700
500.0	0.780	0.360	0.600
600.0	0.470	0.180	0.310
700.0	0.230	0.070	0.130
800.0	0.110	0.050	0.090
900.0	0.060	0.040	0.070
1000.0	0.040	0.020	0.040
1100.0	0.020	0.010	0.020
1200.0	0.000	0.000	0.000

Використовуючи прийняті закономірності щодо міцності бетону та арматурної сталі, були побудовані відповідні діаграми деформування. Побудовані діаграми показані на рис. 2.8.

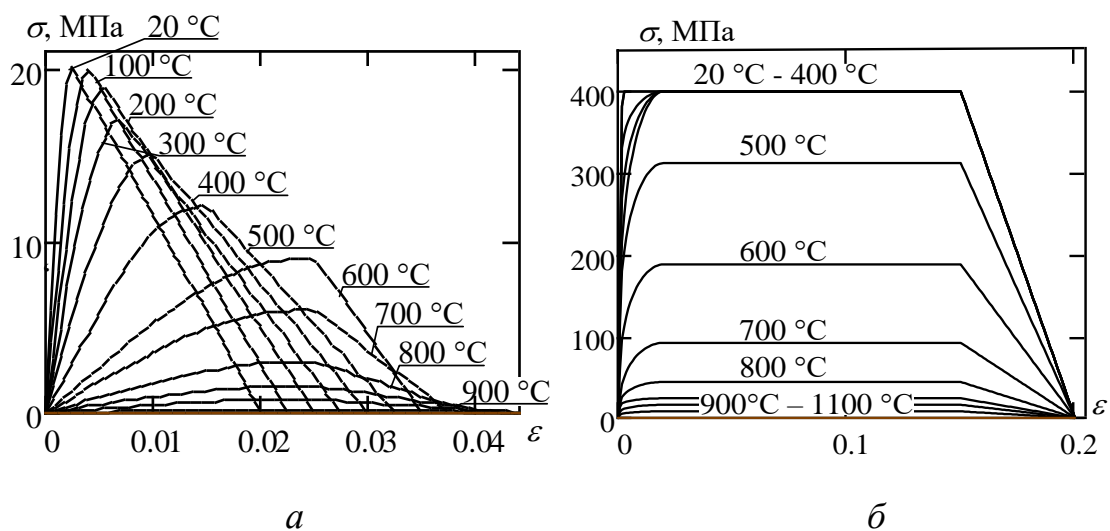


Рисунок – 2.8. Діаграми деформування бетону (а), арматурної сталі (б)

Також, для виконання розрахунку мають бути враховані температурні деформації бетону та арматурної сталі. Водночас

використовано залежності температурні деформації у залежності від температури, рекомендовані у другій частині Єврокода 2 EN 1992-1-2: 2012. Ці залежності зображені на рис. 2.9 у вигляді відповідних кривих.

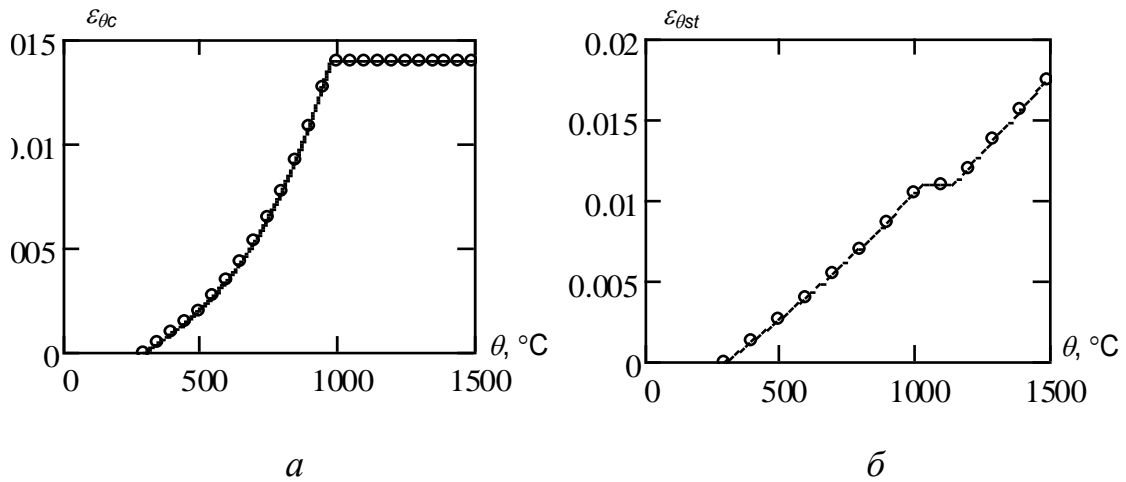


Рисунок – 2.9. Залежності температурних деформацій від температури нагрівання: *a* – бетону; *б* – арматурної сталі

Для врахування температурних деформацій під час розрахунку задається коефіцієнт температурного розширення. Цей коефіцієнт визначають як першу похідну від температурної деформації. На рис. 2.10 наведені температурні криві коефіцієнта температурного розширення бетону та арматурної сталі.

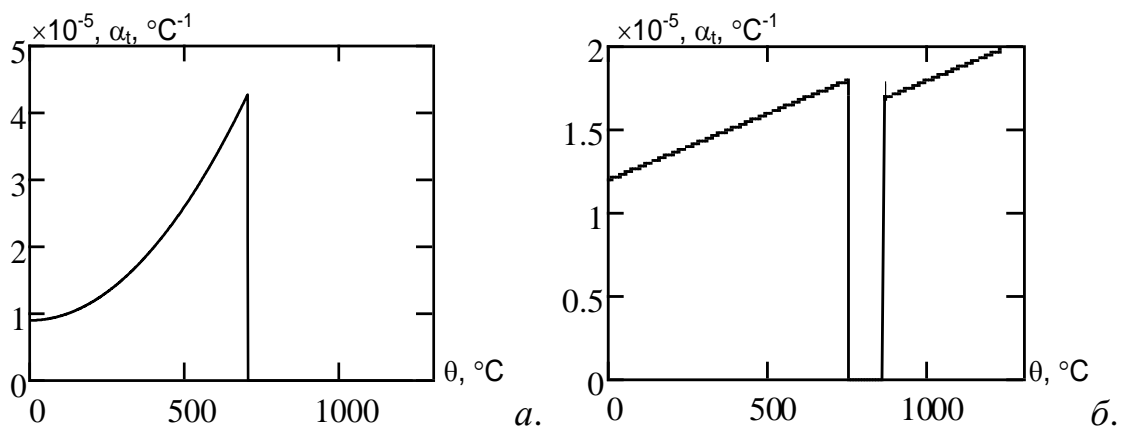


Рисунок – 2.10. Залежності коефіцієнта температурного розширення від температури нагріву: *a* – бетону; *б* – арматурної сталі

Коефіцієнт температурного розширення визначають як першу похідну від температурної деформації.

2.1.5. Розрахункові схеми залізобетонної балки для розрахунку міцності

Для проведення розрахунку міцності залізобетонної балки в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі була розглянута схема дії механічного навантаження та закріплення, яка зображена на рис. 2.11.

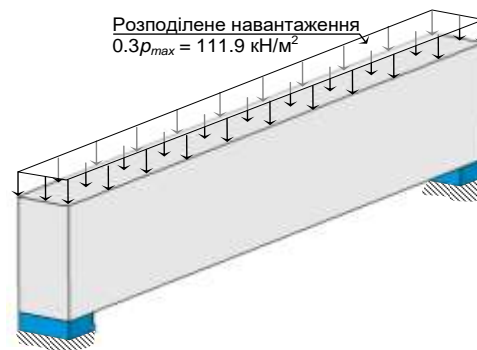


Рисунок – 2.11. Розрахункова схема залізобетонного ригеля для розв'язання задачі міцності

Використовуючи цю розрахункову схему, була побудована скінченно-елементна схема, яка зображена на рис. 2.12.

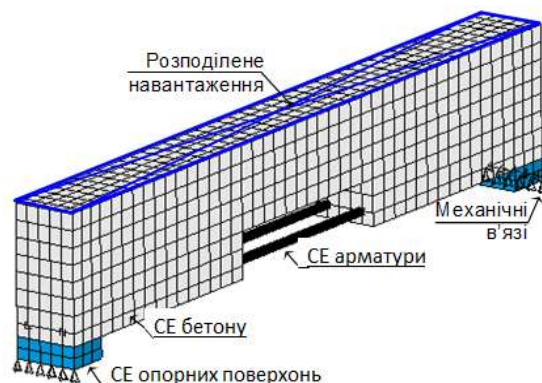


Рисунок – 2.12. Розрахункова схема залізобетонної балки для розв'язування задачі міцності

2.1.6. Результати розв'язування задачі міцності

Після виконання розрахунків було отримано дані щодо характеристик напружено-деформованого стану досліджуваної залізобетонної балки. Основними даними, що були отримані у результаті розрахунку, є крива залежності максимального прогину залізобетонної балки залежно від часу теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі, що представлена у вигляді відповідної кривої на рис. 2.13.

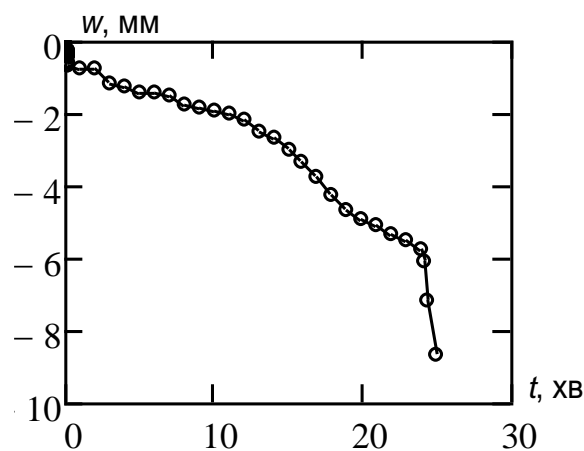


Рисунок – 2.13. Графік залежності критичного прогину залізобетонної балки залежно від часу випробування

На рис. 2.13 можна прослідкувати початковий етап навантаження діючим механічним навантаженням, поступовим нарощуванням прогину у результаті підвищення температури у шарах бетону та арматурної сталі залізобетонної балки. На останньому етапі можна побачити стрибкоподібне нарощування максимального прогину, що можна пов'язати із руйнуванням балки внаслідок деградації бетону, коли її нагрівають до високих температур. Це припущення можна перевірити за допомогою параметрів критичного прогину та швидкості нарощування максимального прогину, що обчислюють за формулами відповідно:

$$D = 2.5 \cdot 10^{-3} L^2 h^{-1}, \quad dD/dt = 1.111 \cdot 10^{-4} L^2 h^{-1}, \quad (2.15)$$

де: L – довжина прольоту балки чи ригеля;

h – висота перерізу балки чи ригеля, мм.

Критичні значення і критична швидкість наростання максимального прогину, обчислені за формулами (2.15) становлять відповідно $D = 19$ мм та $dD/dt = 0,833$ мм/хв. Очевидно, що значення критичного прогину не було досягнуто. Для ідентифікації настання межі вогнестійкості за несучою здатністю за умови досягнення критичної швидкості деформації був побудований відповідний графік, зображений на рис. 2.14.

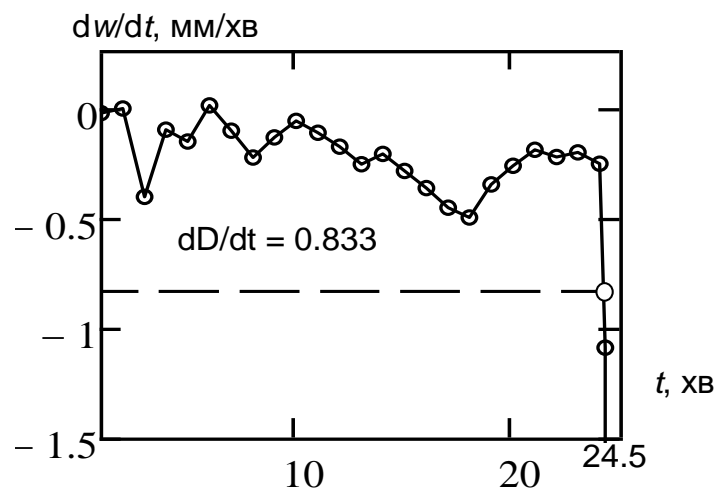


Рисунок – 2.14. Графік залежності критичного прогину залізобетонної балки залежно від часу випробування

Можна побачити, що втрата несучої здатності залізобетонної балки відбувається, коли пройшло 24,5 хв теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі.

На рис. 2.15 наведено розподілення сумарної деформації по серединному перерізу залізобетонної балки у різні моменти часу теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі.

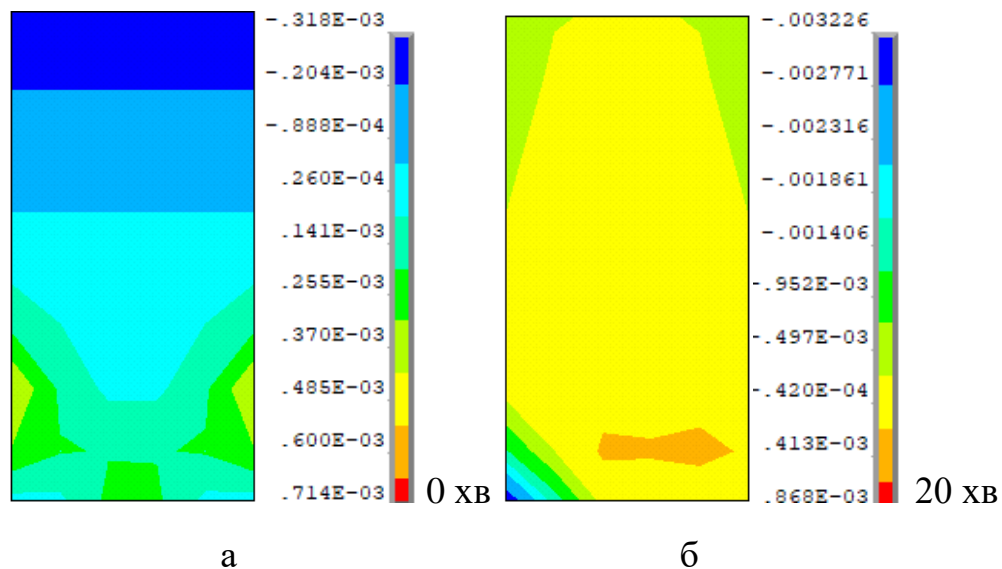


Рисунок – 2.15. Графік залежності критичного прогину залізобетонної балки від часу випробування: *а* – на початку випробування при дії тільки механічного навантаження; *б* – на 20 хв випробування перед руйнуванням

За даними рис. 2.15 можна зробити висновок, що деформації у верхніх шарах стиснутого бетону та шарах бетону у місцях розташування арматурних стрижнів приблизно мають однакові значення. Така картина також дозволяє припустити, що напружено-деформований стан у перерізі залізобетонної балки можна описати з використанням гіпотези плоских перерізів та деформаційної моделі за концепцією чистого згину.

2.2. Обґрунтування методу ідентифікації механічних властивостей бетону залізобетонної балки та ригеля

Результати, що були отримані під час розрахунку поведінки залізобетонної балки в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі можна використати для обґрунтування методу дослідження закономірностей зміни міцності бетону залежно від температури на основі вимірювань, отриманих під час вогневих випробувань за спеціальною методикою. Це дозволяє уточнити діаграми деформування для бетону, що рекомендовані у настанові [47]. Для

досягнення цієї мети можна використати підхід, описаний у роботах [72, 73]. Цей підхід полягає у виконанні таких процедур.

1. Виконання вогневих випробувань за методиками, рекомендованими стандартами [42, 43, 50].

2. Обчислення розподілу температури у перерізі залізобетонного ригеля чи балки за допомогою запропонованого у роботі [73] метода інтерполяції температур.

3. Розділення перерізу на шари за допомогою накладання на нього прямокутної сітки.

4. Складання системи лінійних алгебраїчних рівнянь рівноваги внутрішніх шарів, отриманих шляхом накладання прямокутної сітки, використовуючи експериментальну криву максимального прогину залізобетонного ригеля чи балки, отриманий розподіл температури по перерізу та геометричні розміри залізобетонного ригеля чи балки.

5. Розв'язання отриманої системи лінійних алгебраїчних рівнянь і ідентифікація коефіцієнтів зниження міцності бетону.

6. Будування уточнених діаграм деформування бетону на основі отриманих коефіцієнтів зниження міцності бетону.

Зважаючи на описану вище методику, можна зазначити, що однією з найбільш важливих процедур є обчислення розподілів температури по перерізу залізобетонного ригеля чи балки на основі отриманих точкових вимірювань під час проведення стандартних вогневих випробувань.

2.2.1. Метод інтерполяції температур у перерізі залізобетонної балки та ригеля за результатами випробувань

У роботах [84 – 109] наведений великий обсяг даних, отриманих в процесі високотемпературних вогневих випробувань елементів залізобетонних конструкцій за стандартним температурним режимом пожежі. Водночас, у більшості випадків випробовувалися ригелі та балки

прямокутного перерізу. Схема розташування контрольних точок, де встановлені термометри під час випробувань, має вигляд, що зображений на рис. 2.16.

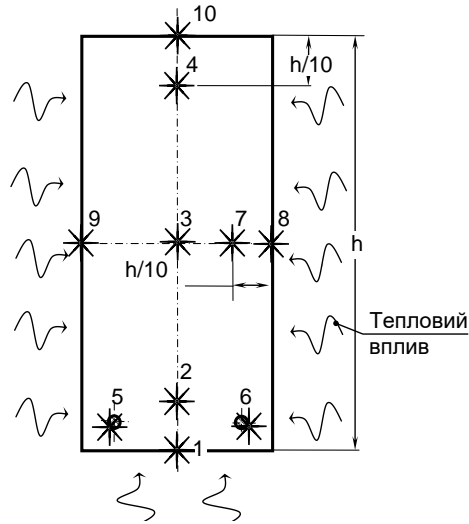


Рисунок – 2.16. Розташування контрольних точок термометрів у перерізах залізобетонних ригелів та балок

Для інтерполяції температурних розподілень вздовж лінії контрольних точок на лінії термометрів 1 – 10 перерізу, що показано на рис. 2.16 згідно із результатами, описаними у роботах [72, 73], запропонований підхід заснований на використанні виразу:

$$\theta_{k,i} = \theta_{0k} + (\theta_{maxk} - \theta_{0k}) \left[\frac{i}{n} \right]^{Q_k}, \quad (2.16)$$

де: $\theta_{k,i}$ – температура i -тої точки серединної контрольної лінії симетрії температурного поля у перерізі ригеля чи балки у k -тий момент часу (див рис. 2.7 та рис. 2.16);

n – кількість інтервалів між контрольними точками;

θ_{0k} , θ_{maxk} – температура першої та останньої точок контрольної лінії у перерізі ригеля чи балки у k -тий момент часу.

Показник ступеня виразу (2.16) визначаємо шляхом варіації і підбирання такого його значення, коли досягає мінімуму середньоквадратична нев'язність:

$$\Phi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m [\theta_{iM} - \theta_{iE}]^2 \rightarrow \min, \quad (2.17)$$

де: θ_{iM} θ_{iE} – розрахункове та експериментальне поточне значення температури у відповідній просторово-часовій контрольній точці;

m – кількість i -тих просторово-часових контрольних точок.

Для пошуку мінімуму цільового функціоналу (2.2) був використаний алгоритм покрокового спуску, що наданий на рис 2.17.

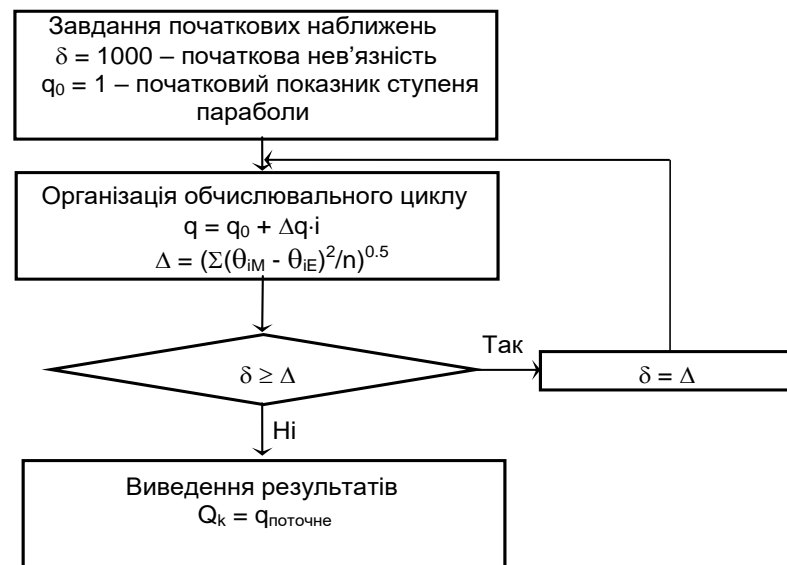


Рисунок – 2.17. Алгоритм покрокового спуску апроксимуючої парабули

На рис 2.18 зображені розподілення температури вздовж вертикальної лінії контрольних точок, що отримано за допомогою апроксимації. На графіках показана імовірна похибка під час визначення температури

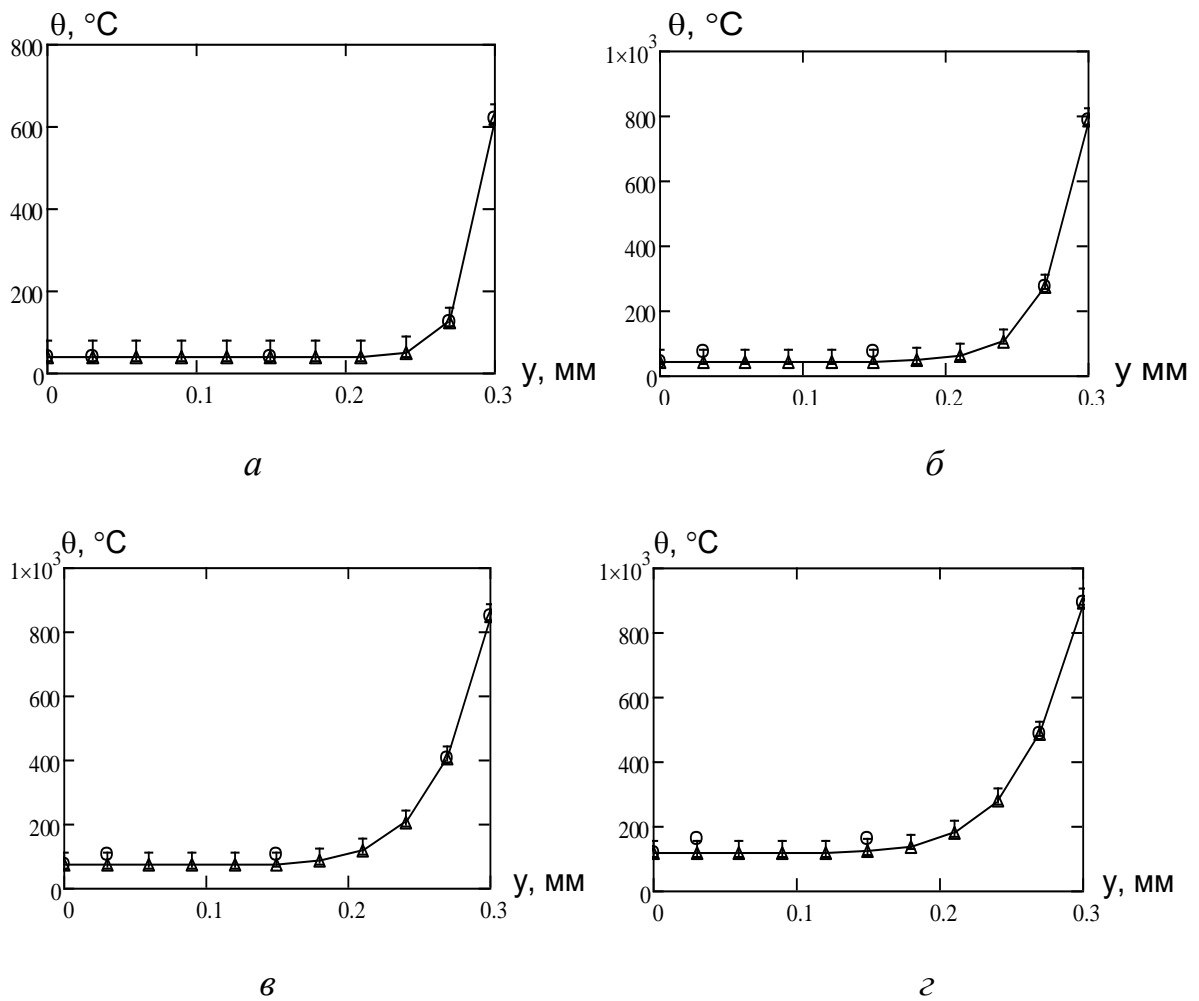


Рисунок – 2.18. Температурні розподіли по вертикальній лінії розташування термопар у перерізі залізобетонної балки 300×150 мм з важкого бетону у різні моменти часу дії «стандартної» пожежі: *a* – на 15 хв; *б* – на 30 хв; *в* – на 45 хв; *з* – на 60 хв. $\circ\circ\circ$ – «експериментальні» дані; $\triangle\triangle\triangle$ – результати апроксимації

Похибка при запропонованому методі є не більшою за 6 % і у середньому становить 3,5 %. Запропонований метод апроксимації є достатньо точним, оскільки середньоквадратичне відхилення даних апроксимації від усереднених даних – не більше 8 °C.

Графік на рис. 2.18 із вказаною на ньому експериментальною похибкою показує, що результати, які отримані у наслідок апроксимації за запропонованим методом не виходять за межі експериментальної похибки, що показує їхню високу точність та імовірність.

Для інтерполяції температури по перерізу залізобетонної балки застосовано метод рекомендований у роботі [20, 66, 72] параболічними кривими, за допомогою методу апроксимації ізотерм у перерізі. При наближенні ізотерм параболічними кривими m -того порядку використовують аналітичний вираз:

$$y(x) = y_0 + \frac{y_0}{x_0^m} \cdot x^m, \quad (2.18)$$

де: m – показник степеня кривої еліпса, що є наближенням ізотерми;
 x_0 і y_0 – координати точки, де перетинаються осі координат та апроксимуюча крива.

Ступінь m функції, як і в першому випадку, визначає порядок кривизни параболічної кривої. Чим більше ступінь m , тим більша кривизна. Отже, для інтерполяції температурного поля можна використати такий же підхід. В цьому випадку вираз (2.18) можна записати у вигляді такого параметричного рівняння:

$$y_0 - y - \frac{y_0}{x_0^m} \cdot x^m = 0. \quad (2.19)$$

Параметри цього рівняння можна визначити за формулами:

$$y_0 = [(\theta_{dk} - \theta_0)(\theta_{vk} - \theta_0)^{-1} d_0^{Qv}]^{Qv^{-1}}; \quad x_0 = [(\theta_{dk} - \theta_0)(\theta_{gk} - \theta_0)^{-1} d_0^{Qg}]^{Qg^{-1}}, \quad (2.20)$$

$$x = d \cdot a / (a^2 + h^2); \quad y = d \cdot h / (a^2 + h^2), \quad (2.21)$$

де: θ_{dk} , θ_{gk} , θ_{vk} – температури, що визначені на обігрівних поверхнях перерізу;

Q_d , Q_g , Q_v – показники ступеня функції (2.21), що розраховані для діагоналі та середніх горизонталі та вертикалі перерізу;

θ_0 – температура найменш нагрітої точки перерізу;

d_0 – довжина відрізка по діагоналі від початку координат до даної вузлової точки;

d – довжина радіального відрізка від початку координат до точки із поточними координатами;

h , a – висота і ширина перерізу відповідно.

Якщо підставити ці вирази у рівняння (2.19), можна помітити, що воно має аналітичний розв'язок, який має такий вигляд:

$$m = \log_{\frac{d \cdot h}{a^2 + h^2} (\theta_{dk} - \theta_0)(\theta_{vk} - \theta_0)^{-1} d_0^{Q_g}} \left[\left(\left[(\theta_{dk} - \theta_0)(\theta_{vk} - \theta_0)^{-1} d_0^{Q_v} \right]^{Q_d} - d \cdot h / (a^2 + h^2) \right) \left[(\theta_{dk} - \theta_0)(\theta_{vk} - \theta_0)^{-1} d_0^{Q_v} \right]^{Q_d} \right], \quad (2.22)$$

Після визначення порядку кривизни парабол, для визначення температур у вузлових точках перерізу використовується метод лінійної інтерполяції як вказано у попередньому пункті.

Використовуючи такий підхід, можна визначити температуру для кожної поточної вузлової точки перерізу.

Використовуючи сформульовані положення запропонованого методу, був розроблений алгоритм визначення температури у вузлових точках перерізу. Він ґрунтується на проведенні інтерполяції температур за температурними даними у контрольних точках перерізу. На рис. 2.19 наведена блок-схема даного алгоритму.



Рисунок – 2.19. Блок-схема алгоритму для обчислення величин температур у вузлових точках у перерізі залізобетонного балки та ригеля

Для такого способу апроксимації ізотерм був розроблений спосіб, що реалізується за допомогою обчислень координати y із використанням отриманих параметрів y_{0k} , x_{0k} , m_k вздовж вертикальної лінії із координатою x поточної точки в якій визначено температуру. Температуру поточної точки визначено шляхом лінійної інтерполяції між температурами сусідніх ізотерм, між якими вона знаходиться, за координатами точок перетину цих ізотерм і за відповідної вертикальної лінії з координатою x поточної точки. Схема інтерполяції за цим способом наведена на рис. 2.20.

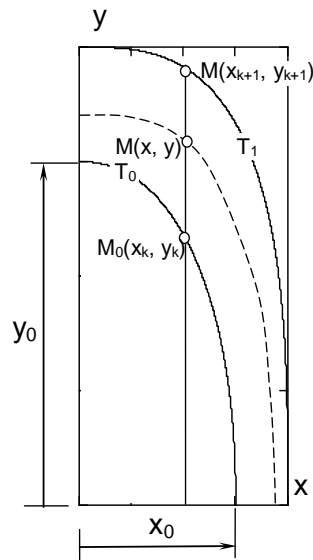


Рисунок – 2.20. Схема проведення інтерполяції в перерізі фрагмента залізобетонної балки та ригеля

Для виконання інтерполяції використовуємо формулу:

$$\theta_{p,q} = \theta_0 + (\theta_1 - \theta_0)(y_{k+1} - y_k)^{-1} y_{p,q} \quad (2.23)$$

Таким чином, був запропонований метод інтерполяції температурних розподілень у залізобетонних балках та ригелях, що ґрунтується на вимірюванні температури у контрольних точках їхнього перерізу під час високотемпературних випробувань за стандартним температурним режимом.

Використавши запропонований підхід, було проведено відповідні обчислення для залізобетонної балки із перерізом, схема якої надана на рис. 2.1. Як імітацію температурних показників, які вимірюють під час вогневих випробувань, було використано розрахункові дані, що описані у цьому розділі.

Для якісного оцінювання адекватності результатів були побудовані у вигляді ізоліній температурні поля у перерізі. На рис 2.21 зображені побудовані температурні поля.

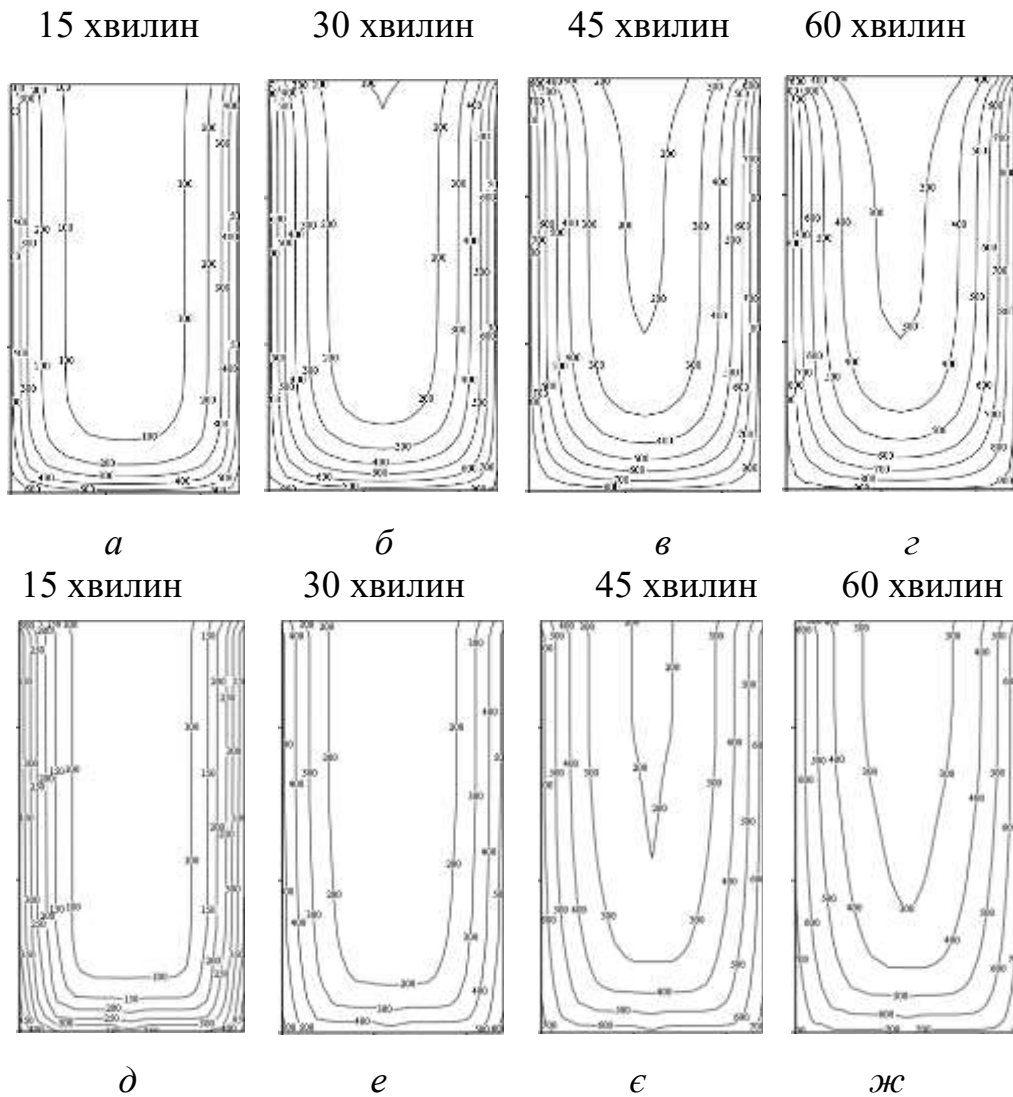


Рисунок – 2.21. Температурні розподіли у перерізі досліджуваної залізобетонної балки 300×150 мм у різні моменти часу дії «стандартної» пожежі: *а* – 15 хв, *б* – 30 хв, *в* – 45 хв, *г* – 60 хв (за теоретичним підходом); *д* – 15 хв, *е* – 30 хв, *є* – 45 хв, *ж* – 60 хв (за результатами інтерполяції)

З наведених даних щодо розподілів температури можна зафіксувати, що інтерполяція, виконана за запропонованим методом, дає адекватні результати. Можна зазначити помітну розбіжність форм отриманих поверхонь. Вони мають розриви за першою та другою похідними. Проте, цей підхід дає достатньо точне припущення.

Для детального аналізу були порівняні початкові дані, тобто дані, що отримані за теоретичного підходу і відповідні результати інтерполяції,

отримані за запропонованим методом. Результати порівняльного аналізу подані у табл. 2.8.

Таблиця 2.8. Дані порівняльного аналізу результатів інтерполяції, отриманих за запропонованим підходом

Відхилення максимальне, °С	Відхилення середнє відносне, %	Відхилення середньоквадратичне, °С
76	8,4	18,9

Дані табл. 2.8 свідчать про високу точність методу інтерполяції.

Розробленим методом можна проводити наближення температурних розподілів за дискретними вимірюваннями температур у місцях розміщення термопар.

Відповідно до результатів аналізу інтерполяції температурних розподілів, контрольні точки вимірювання температур мають бути розташовані за головними горизонталлю, вертикаллю та діагоналлю перерізу. Однак, також необхідно розглянути схему, що зумовлена відповідними стандартами [42, 43]. Розташування термопар згідно із чинними стандартами подано на рис. 2.22.

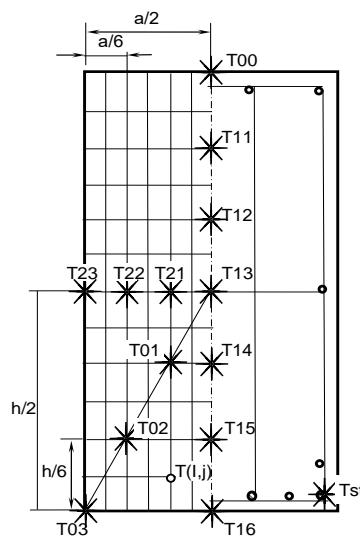


Рисунок – 2.22. Схема розташування термопар та розбиття перерізу ригеля чи балки на зони згідно із чинними стандартами щодо високотемпературних випробувань балок і ригелів

Схема розташування термопар має особливість, яка полягає у тому, що контрольні точки на контрольних лініях розташовуються по чотири на одну лінію згідно із дослідженнями, наведеними у роботі [72], але можна їх знизити до трьох.

Під час оцінювання ефективності стандартної схеми можна застосувати один із методів інтерполяції температурного розподілу у перерізі ригеля та балки, якщо використати дані у контрольних точках згідно із цією схемою.

Для цієї схеми розташування термопар були розроблені дві методики інтерполяції з використанням запропонованих способів. Перша методика полягає у виконанні таких процедур.

1. З використанням мінімізації функціоналу типу (2.2) визначити вигляд функції типу (2.1) шляхом варіювання показника ступеня для контрольних ліній.

2. За допомогою першого або другого способу, визначити параметри вузлових функціоналів, що наближають ізотерми тільки у нижній чверті перерізу ригеля чи балки.

3. Шляхом інтерполяції визначити температури у вузлових точках між ізотермами тільки у вузлових точках нижньої чверті перерізу ригеля чи балки.

4. Першу строчку матриці використати для будування матриці температур верхньої чверті перерізу ригеля чи балки, шляхом її клонування для всіх горизонтальних ліній, на яких розташовані вузлові точки.

На рис. 2.23 наведені температурні розподіли отримані з використанням розробленої методики інтерполяції температур за даними у контрольних точках, розташованих за схемою, яка наведена на рис. 2.22.

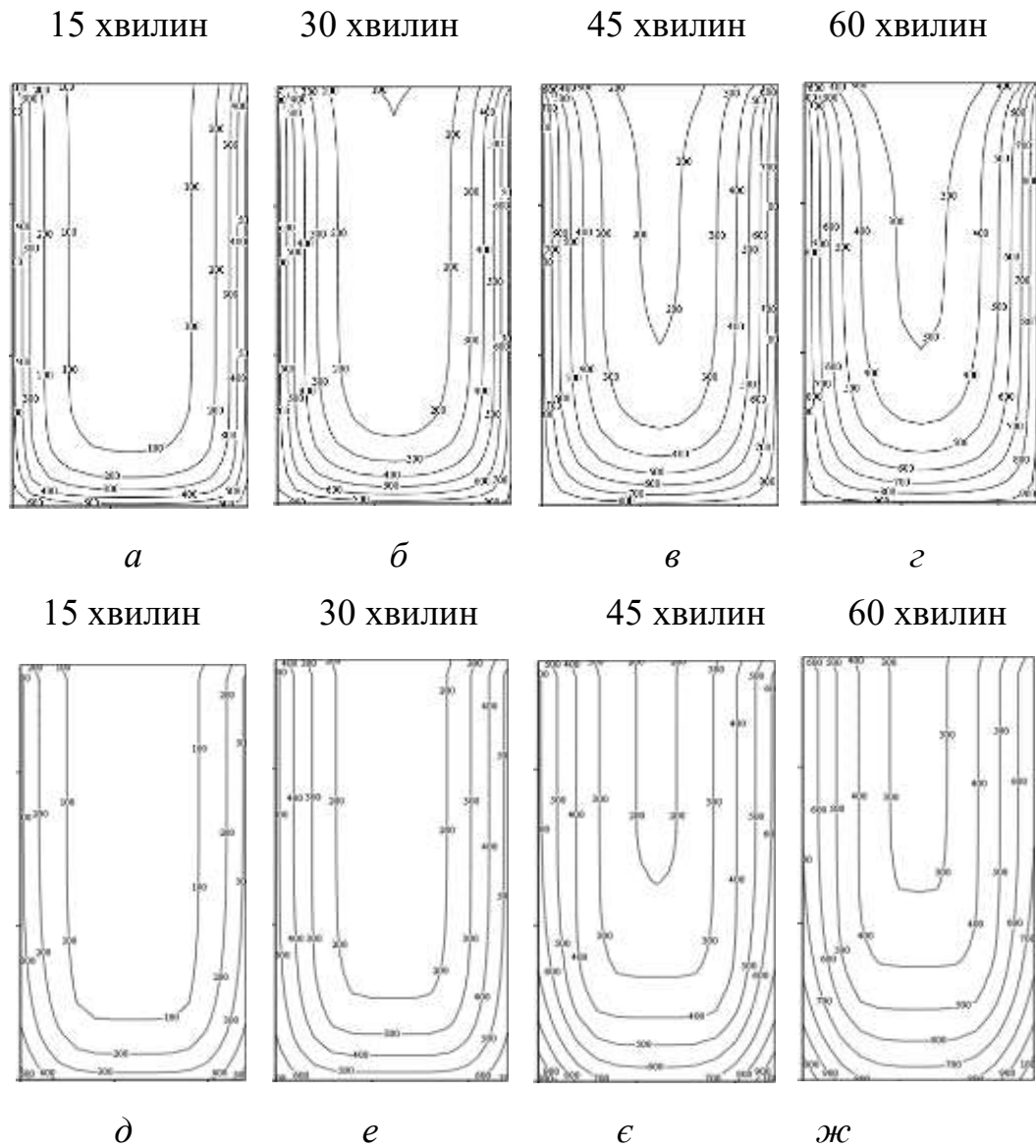


Рисунок – 2.23. Температурні розподіли у перерізі залізобетонної балки 300×150 мм при дії «стандартної» пожежі у різні моменти часу: *a* – 15 хв, *б* – 30 хв, *в* – 45 хв, *г* – 60 хв (за теоретичним підходом); *д* – 15 хв, *е* – 30 хв, *є* – 45 хв, *ж* – 60 хв (коли термопари розташовано за стандартною схемою)

Аналіз даних на рис. 2.23 показує, що використання схеми розташування термопар (див. рис. 2.16) може бути ефективним для визначення температурного розподілення у перерізі залізобетонного ригеля та балки. Для більш детального аналізу точності отриманих результатів були використані статистичні критерії, подані у табл. 2.8. Дані такого аналізу подані у табл. 2.9.

Таблиця 2.9. Дані порівняльного аналізу результатів інтерполяції за стандартною схемою розташування термопар

Максимальне відхилення, °С	Середнє відносне відхилення, %	Середньоквадратичне відхилення, °С
89	10,3	21,6

Для остаточного обґрунтування розташування термопар у перерізі балки та ригеля необхідно визначити їхню необхідну кількість. Виконання алгоритму проведення інтерполяції за розробленими методами зумовлює необхідність розміщення певної кількості термопар за лініями їхнього розташування відповідно до схеми контрольних точок, що наведені на рис. 2.22. Таку кількість термопар визначаємо за отриманими залежностями похибки інтерполяції від кількості контрольних точок на лініях розташування термопар. Зазначені залежності визначаємо шляхом розрахування похибки, яка відповідає середньому відносному відхиленню всіх вузлових точок перерізу у кожний контрольний момент часу.

На рис. 2.24 показані результати відповідних розрахунків у вигляді графіків.

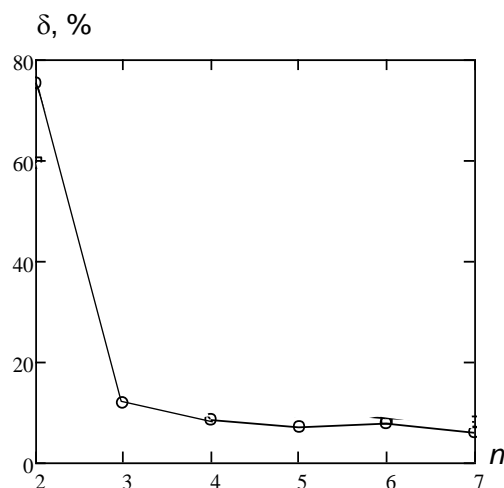


Рисунок – 2.24. Залежності похибки інтерполяції від кількості контрольних точок на контрольній лінії

Згідно з графіками на рис. 2.24, коли кількість точок на контрольній лінії три, похибка починає змінюватися не більше ніж на 1 – 2 %. Але наслідком кожного збільшення контрольної точки на одну вздовж контрольної лінії є збільшення у сумі на три контрольні точки. Така обставина відразу сильно збільшує трудомісткість готування залізобетонних балок та ригелів до випробування. Тому необхідно вибрати найбільш вигідніше співвідношення між точністю, яка залежить від кількості контрольних точок, та трудомісткістю і вартістю підготовчого процесу до випробувань. З огляду на те, що різниця між похибкою, відповідною 3 контрольним точкам вздовж однієї контрольної лінії, та похибкою, відповідною 7 точкам, складає не більше ніж 3%, можна рекомендувати максимальну кількість контрольних точок, яка дорівнює трьом.

2.2.2. Метод ідентифікації механічних властивостей бетону залізобетонної балки та ригеля за результатами випробувань

Під час визначення механічних властивостей бетону для їхнього математичного описування згідно із чинними в Україні стандартами [46, 47] використано діаграми деформування бетону за виразами типу (2.11), і які мають вигляд, наведений на рис. 2.8 а. З огляду на це, для розроблення методу ідентифікації механічних властивостей бетону вирази (2.10) та (2.11) потрібно записати як:

$$\sigma(\varepsilon) = k_{c,\theta} F(\varepsilon, \theta), \quad (2.24)$$

де $F(\varepsilon)$ – функція, залежна від деформації та температури нагрівання певного шару бетону, що описано формулами:

$$\begin{aligned} \text{при } 0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c1,\theta}, \quad \sigma(\varepsilon_c) &= \frac{3\varepsilon_c f_{ck,t}(\theta)}{\varepsilon_{c1,\theta} \left(2 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)}, \\ \text{при } \varepsilon_{c1,\theta} < \varepsilon_c < \varepsilon_{cu1,\theta}, \quad \sigma(\varepsilon_c) &= f_{ck,t}(\theta) \left(1 - \frac{(\varepsilon_c - \varepsilon_{c1,T})}{\varepsilon_{cu1,t} - \varepsilon_{c1,T}} \right), \end{aligned} \quad (2.25)$$

де: f_c – межа міцності матеріалу на стискання;

$\varepsilon_{cu,\theta}$ – максимальне значення відносної деформації, що залежне від температури до настання якого матеріал у змозі чинити опір;

$\varepsilon_{c1,\theta}$ – значення відносної деформації, що залежне від температури до якої діаграма деформування має зростаючу гілку.

Згідно з настановами для розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних конструкцій, чинними в Україні [46, 47], коефіцієнт роботи бетону певним чином залежить від температури, його обчислюють за таблицями шляхом лінійної інтерполяції за 13 значеннями.

Обчислення для ідентифікації коефіцієнта зниження міцності бетону можна виконати за схемою, яка наведена на рис. 2.25.

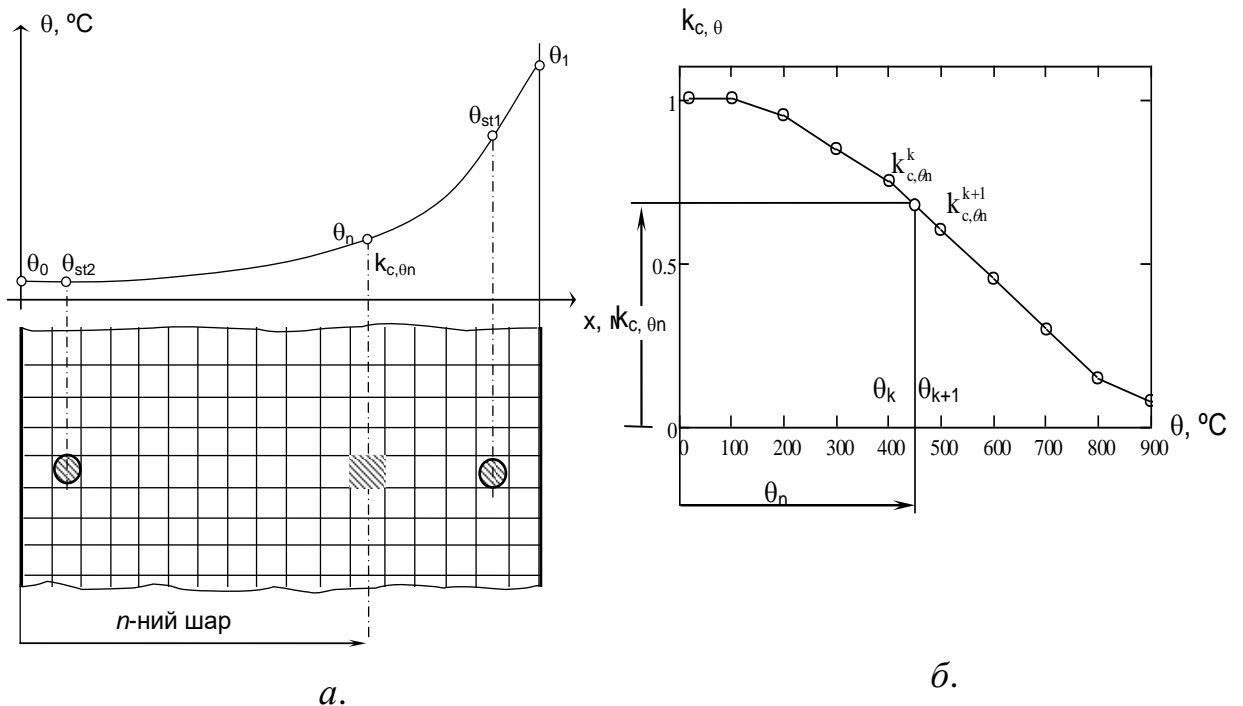


Рисунок – 2.25. Обчислення коефіцієнта зниження міцності бетону за температурою у внутрішньому шарі залізобетонного ригеля: а – схема

розбиття на шари перерізу залізобетонного ригеля; b – схема лінійної інтерполяції коефіцієнта зниження міцності бетону залізобетонного ригеля за табличними даними

Схема, що наведена на рис. 2.25 дозволяє записати систему рівнянь рівноваги для шарів, на які розділений переріз, у зручній формі для визначення уточнених значень коефіцієнта зниження міцності бетону залізобетонного ригеля та балки.

Для описання напружено-деформованого стану у перерізі залізобетонного ригеля та балки в умовах нагрівання застосовано деформаційну модель, що заснована на використанні систем рівноваги внутрішніх шарів у перерізі. Система рівнянь рівноваги має такий вигляд:

$$\begin{cases} \sum_i \sigma_{ci} A_{ci} y_{ci} + \sum_j \sigma_{sj} A_{sj} y_{sj} = M_{Ed} \\ \sum_i \sigma_{ci} A_{ci} + \sum_j \sigma_{sj} A_{sj} = 0 \end{cases}, \quad (2.26)$$

де: M_{Ed} – діючий момент у залізобетонному елементі;

A_{ci} , y_{ci} , σ_{ci} – площа, координати центру тяжіння i -го прямокутного шару бетону і напруження у центрі тяжіння відповідно;

A_{sj} , y_{sj} , σ_{sj} – площа, координати центру тяжіння перерізу j -го арматурного стрижня і напруження у ньому.

Напруження у внутрішніх шарах бетону і арматурної сталі обчислюються з використанням діаграм деформування як функції та кривизни залізобетонних ригелів та їх крайових деформацій за виразами [68, 72]:

$$\sigma_{ci} = f_i(\varepsilon_{ci}), \quad \sigma_{sj} = f_j(\varepsilon_{sj}), \quad \varepsilon_{ci} = \varepsilon_0 + y_{ci} \chi_t, \quad \varepsilon_{sj} = y_{sj} \chi_t, \quad (2.27)$$

де: ε_0 – відносна деформація верхньої точки перерізу у поперечному напрямку;

χ_t – кривизна залізобетонного ригеля в певний момент часу.

Відносну деформацію верхньої точки та кривизну перерізу обчислюємо з використанням гіпотези плоских перерізів за формулами:

$$\varepsilon_0 = \frac{h^2 \chi_t}{2h - z_0}, \quad \chi_t = \frac{48w_t}{5L^2}, \quad (2.28)$$

де: L – довжина прольоту залізобетонного ригеля чи балки;

w_t – максимальний прогин залізобетонного ригеля чи балки у певний момент часу;

z_0 – осьова відстань від крайньої арматури до нижнього краю перерізу залізобетонного ригеля чи балки.

Формули (2.24) та (2.25) дозволяють переписати систему (2.26) як систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР). Невідомі цієї системи є відповідні значення коефіцієнтів зниження міцності бетону залізобетонного ригеля чи балки. Записана таким чином СЛАР набуває вигляду:

$$[F]\{k\} + \{S\} = M_{Ed}, \quad (2.29)$$

де $\{k\} = (k_{c1} \dots k_{c2} \dots k_{cm})^T$ – набір величин коефіцієнтів зниження міцності бетону відповідних табличним значенням температур $\{\Theta_m\} = (0 \dots 100 \dots 200 \dots \theta_m)^T$, які є невідомими записаної СЛАР;

$[F]$ – матриця коефіцієнтів СЛАР, що має такий вигляд:

$$[\mathbf{F}] = \begin{pmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1j} & \dots & Z_{1m} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{i1} & & Z_{ij} & & Z_{im} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{m1} & \dots & Z_{mj} & \dots & Z_{mm} \end{pmatrix}, \quad (2.30)$$

де параметри матриці коефіцієнтів обчислюємо за виразами:

$$\begin{aligned} Z_{i1} &= \sum_n [1 - 0.01(\theta_{ni} - \theta_1)] F_n(\varepsilon, \theta_{ni}) A_c y_n, \\ Z_{im} &= \sum_n 0.01(\theta_{ni} - \theta_{m-1}) F_n(\varepsilon, \theta_{ni}) A_c y_n \\ Z_{ij} &= \sum_n [1 - 0.01(\theta_{ni} - \theta_j)] F_n(\varepsilon, \theta_{ni}) A_c y_n + \sum_n 0.01(\theta_{ni} - \theta_{j-1}) F_n(\varepsilon, \theta_{ni}) A_c y_n \end{aligned} \quad (2.31)$$

Величина $m = [\theta_{max} \cdot 0.01]$ – це кількість рівнянь та перемінних у СЛАР (2.29), що обчислюють за максимальною температурою нагрівання залізобетонного ригеля чи балки під час вогневих випробувань.

Коли записано рівняння для конкретних моментів часу випробувань, величину максимального прогину встановлено рівномірно між першим моментом часу випробувань та часом, коли зберігається відповідність епюри деформацій та напружень лінійній залежності.

У СЛАР (2.29) $\{S\}$ – це вектор зусиль у арматурі, який обчислено з використанням такої формули:

$$\{S\} = (S_1 \dots S_i \dots S_m)^T, \quad (2.32)$$

$$\text{де } S_i = \sum_p F_{st,p}(\varepsilon, \theta_{st,p})$$

Зусилля у p -тому арматурному стержні в i -тий момент часу обчислюються за виразами, рекомендованими настановами щодо розрахунку на вогнестійкість залізобетонних конструкцій [47] за виразами (2.12) – (2.14).

Таким чином, з використанням результатів вимірювань температури та максимального прогину залізобетонного ригеля чи балки, одержаних в процесі вогневих випробувань, було виконано уточнення коефіцієнта зниження міцності бетону. Для цього було застосовано математичний апарат (2.26) – (2.31) та результати розрахунку, отримані у цьому розділі роботи для балки 150×300мм, які є як вимірні дані. На рис. 2.26 показані криві залежності коефіцієнта зниження міцності бетону, що отримані для досліджуваного елемента і взяті для розрахунку.

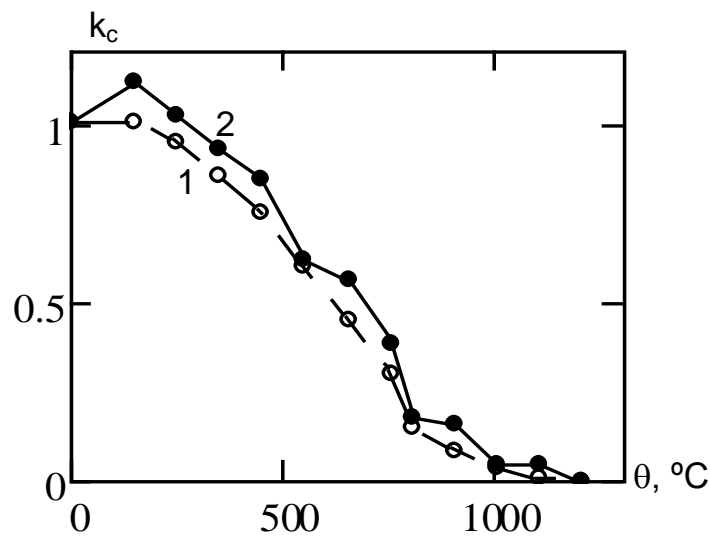


Рисунок – 2.26. Залежності коефіцієнту зниження міцності бетону: 1 – стандартна залежність, 2 – уточнена залежність

Середня відносна похибка отриманих результатів уточненої залежності коефіцієнта зниження міцності бетону становить не більше 6,4 %. Це відповідним чином підтверджує ефективність розробленого метода ідентифікації механічних характеристик бетону.

2.3. Висновки до розділу

Результати проведених досліджень дозволяють зробити такі висновки:

1. Досліджено поведінку залізобетонної балки за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі за результатами чисельного випробування з використанням метода скінченних елементів.

2. Отримано дані про температурні розподілення та параметри напружено-деформованого стану залізобетонної балки за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі.

3. Обґрунтований метод розрахунку уточнених коефіцієнтів зниження міцності бетону залізобетонних балок та ригелів прямокутного перерізу.

4. Показано, що результати, отримані за допомогою методу ідентифікації коефіцієнтів зниження міцності бетону, є адекватними, оскільки їхня відносна похибка у середньому становить не більше 6,4 %.

5. Показано, що обґрунтований метод ідентифікації коефіцієнтів зниження міцності бетону є ефективним і може бути застосованим для аналізу термомеханічних властивостей бетону залізобетонних ригелів та балок для удосконаленого методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів.

РОЗДІЛ 3. ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Експериментальне обладнання

Для проведення вогневих випробувань використано вогневу піч ГП-3 (атестат № 24-2/4379), приміщення для кондиціонування досліджуваних зразків ПКЗ-2 (атестат № 24-2/0442) і засоби вимірювальної техніки, описані в табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Вимірювальне обладнання

№ п/п	Найменування вим. засобу	Номенк. номер	Інтервал Вимір.	Похибка вимірювань
1.	Лінійка вимірювальна	-	0 ÷ 1000 мм	± 1 мм
2.	Хронометр СОСпр-26-2-010	3187	0 ÷ 60 хв,	Середній клас точності
3.	Система автоматичного вимірювання температури «СКОРАД» із блоками Вега-5	-	-5 ÷ 1300°C	Межа похибки вимірів ± 1,5 °C
4.	Хромель-алюмелева термопара ТХА, 6 одиниць	-	-50 ÷ 450 °C	Клас 2
5.	Термопари N (1450 мм), 8 одиниць	-	0 ÷ 1200 °C	Клас 2
6.	Термогігрометр АРТ-06917	1045	25 ÷ 90 % 0 ÷ 50 °C	± 5 % ± 1,0 °C
7.	Штангенциркуль ЩЦ-Па	0711110	0 ÷ 300 мм	± 0,05 мм
8.	Мановакуумметр цифровий ММЦ-200	20	0 ÷ 200 Па	± 0,5 %
9.	Сушильна шафа	Б/Н	20 ÷ 100 °C	± 2,5 °C
10.	Ваги ULTRA	021	0 ÷ 200 г	± 0,1 г
11.	Щупи діаметром: 6 мм 25 мм	Б/Н Б/Н	6 мм ÷ 25 мм	± 0,1 мм

Продовження табл. 3.1

№ з/п	Найменування обладнання або приладу	Заводський номер	Діапазон вимірювання	Похибка вимірювань
12.	Ваги кранові електронні OCS-M-lt.	1504	від 10 кг до 1000 кг	Клас точності – середній
13.	Віддалемір лазерний ручний Disto D3a BT.	902830600	від 0,05 до 100 м	± 1 мм

На рис. 3.1 наведена схема випробувальної установки, а на рис 3.2 наведений її загальний вигляд.

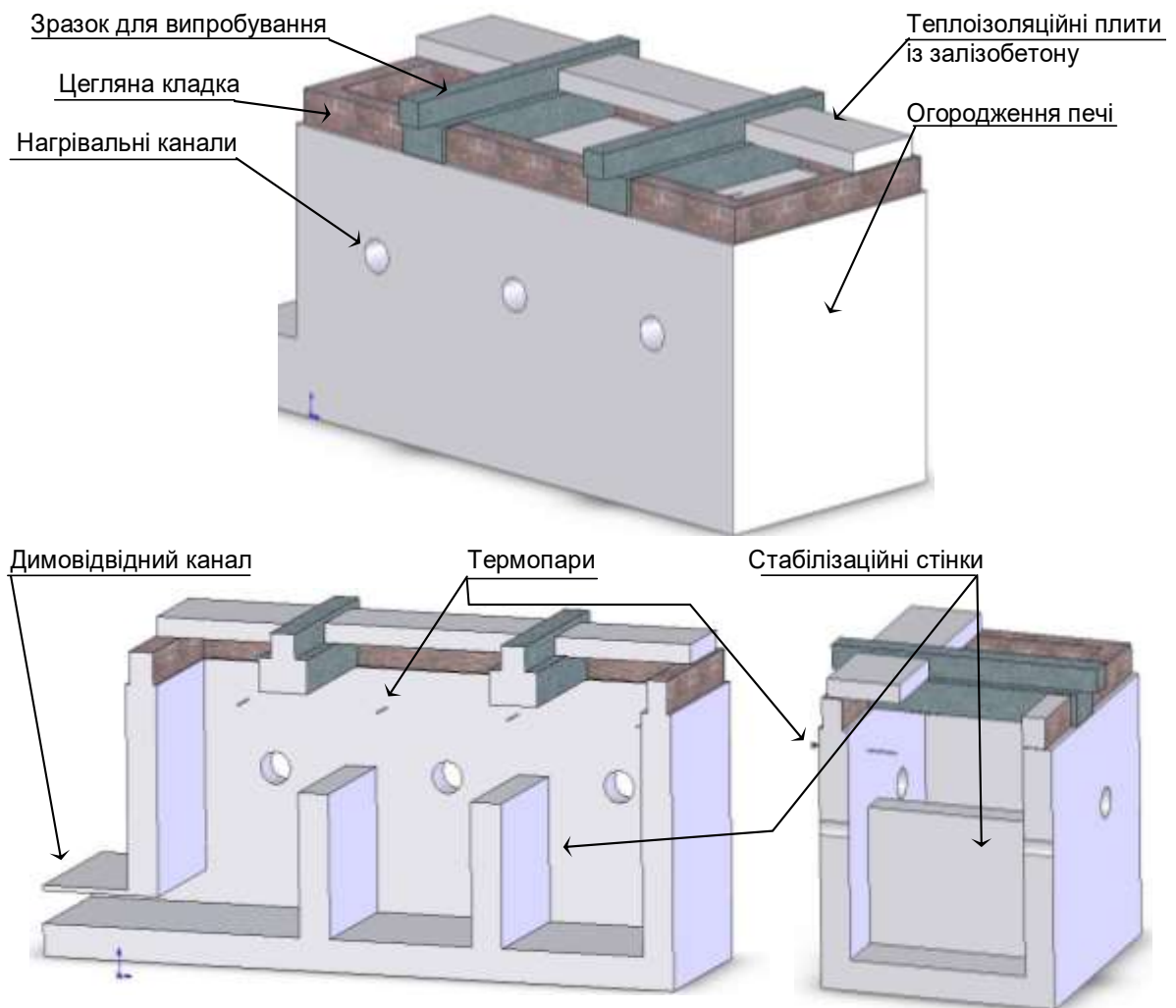


Рисунок – 3.1. Схема випробувальної установки

На рис. 3.1 представлена схема розташування ригелів із відповідним огородженням, що перешкоджає вивітрювання пічних газів. Це огороження складається з залізобетонних плит з цегляною кладкою. На рис. 3.2 показані різні фрагменти установки для випробувань.



a



б



в

Рисунок – 3.2. Загальний вигляд установки для випробувань: *a* – загальний вигляд; *б* – внутрішній простір камери печі; *в* – форсункова система

На рис 3.3 зображений інтерфейс до програмного забезпечення, призначеного для компіляції даних та управлінням розходу палива форсункової системи.

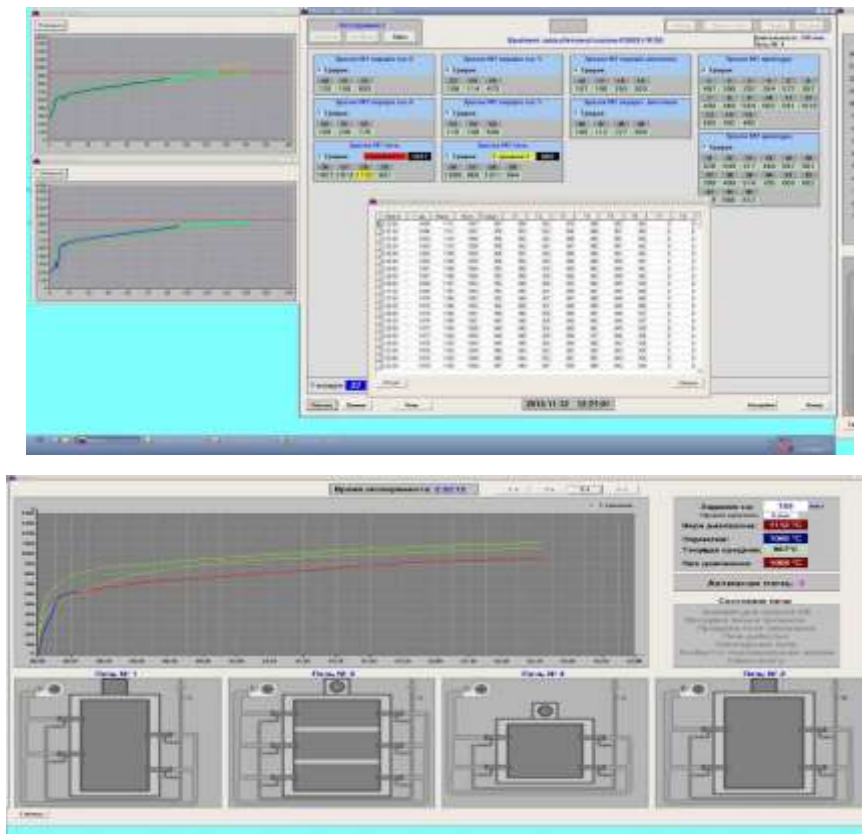


Рисунок – 3.3. Інтерфейс програмного забезпечення системи контролю температури

На рис. 3.4 показано влаштування термопар для фіксування показників температур у робочому просторі печі.

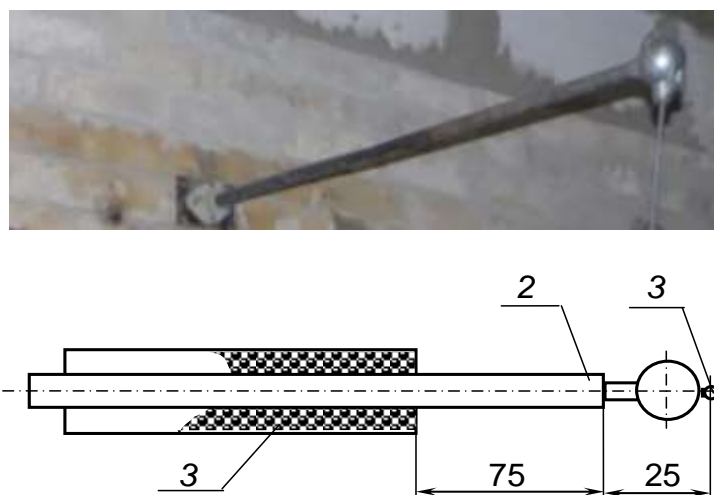


Рисунок – 3.4. Термопара для вимірювання температури в камері печі: 1 – теплозахисна оболонка; 2 – кожух для захисту термопарти; 3 – спай для вимірювання температури

На рис. 3.5 зображена схема розташування термопар для проведення експерименту щодо високотемпературних випробувань залізобетонних ригелів.

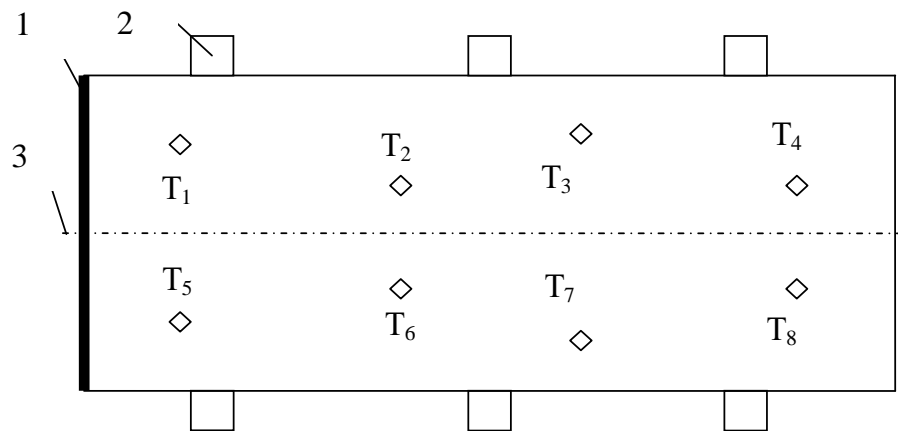


Рисунок – 3.5. Схема контролю температурного режиму: T_1 – T_8 – термопари; 1 –отвори для відводу продуктів горіння; 2 – пальник, 3 – симетрична вісь

3.2. Методика виготовлення та формування залізобетонних ригелів-зразків для випробувань

3.2.1. Виготовлення залізобетонного ригеля-зразка для високотемпературних випробувань

З метою вивчення результативності розробленого методу інтерполяції температурних полів у перерізах залізобетонних ригелів під час їхніх високотемпературних випробувань були розглянуті серійні залізобетонні ригелі марки P2-72-26 серії ИИ 04-3 випуск 3. Такий тип ригеля вибраний з огляду на широке його застосування, а також щоб показати, що розроблена методика інтерполяції може бути ефективно застосована не тільки для ригелів чіткої прямокутної форми, а також і для

ригелів таврового типу. У табл. 3.2 надане технічне описування та основні характеристики залізобетонних ригелів вибраного типу.

Таблиця 3.2. Технічні характеристик залізобетонних ригелів
для дослідження

Марка і серія залізобетонного ригеля	Матеріал ригеля	Конструктивні характеристики
P2-72-26 серії ИИ 04-3 випуск 3	Бетон – звичайний на гранітному заповнювачі (клас міцності С30/35)	Несучі збірні каркаси із ригелів 400×450 з високим рівнем механічного навантаження
	Робоча арматура – гарячекатаний сталевий ребристий стрижень класу міцності А400С	

Залізобетонні ригелі-зразки для випробування – це балкові елементи із полицями для розташування на них залізобетонних панелей. На рис. 3.7 показана геометрія перерізу та схема розташування арматури. Розміри зразків: ширина – 400 мм; довжина – 2 560 мм; висота – 450 мм.

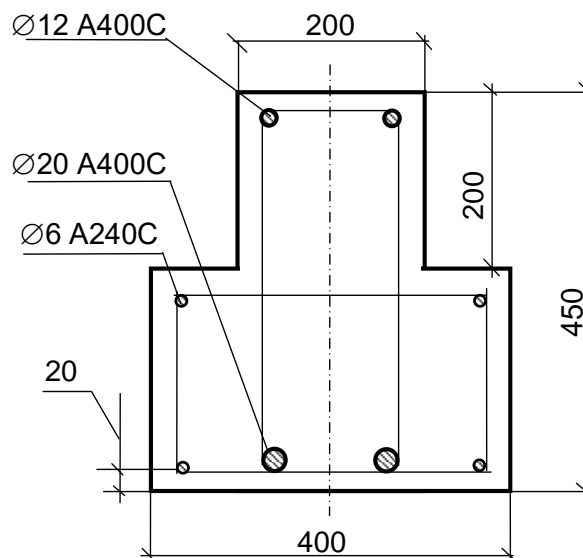


Рисунок – 3.6. Схема армування перерізу та геометричні розміри залізобетонного ригеля-зразка для випробування

У табл. 3.3 зведені величини основних параметрів залізобетонного ригеля-зразка. Відповідно до вимог програми експерименту щодо цього фрагменту, суміш для виготовлення залізобетонного ригеля ґрунтується на використанні з бетону С 30/35 (В30). В табл. 3.4 наведені параметри даної суміші.

Таблиця 3.3. Основні параметри залізобетонних ригелів-зразків

Характеристика зразка	Позначка	Величина	Од. виміру
Розміри перерізу зразка: ширина	s	0.400	м
висота	h	0.450	
ширина захисного шару	w	0.020	
довжина зразка	l	2.560	
Вид бетону	Звичайний бетон із гранітним заповнювачем	Клас міцн. С 30/35 (В30)	
Густина	ρ_B	2300	кг/м ³
В/Ц	--	0,36	
Гранична вологість	u	< 3	%
Нижня робоча арматура: діаметр	d_1	0,02	м
клас міцності		A400C	
Додаткова арматура: діаметр	d_2	0,006	м
клас міцності		A240C	
Верхня робоча арматура: діаметр	d_3	0,012	м
клас міцності		A400C	
Каркасна арматура: діаметр	d_4	0,006	м
клас міцності		A240C	

На рис. 3.7 наведена схема геометричної конфігурації залізобетонного ригеля.

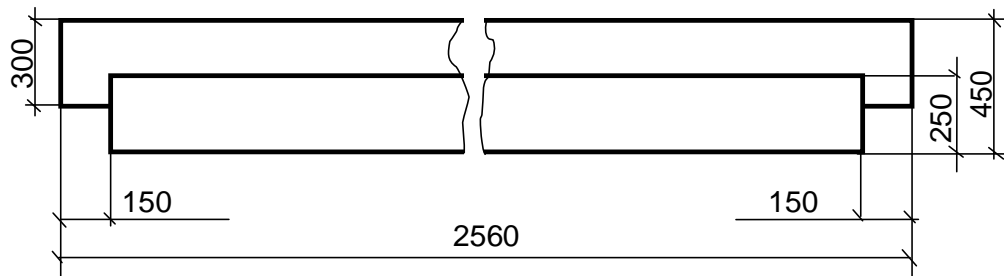


Рисунок – 3.7 . Схема геометричної конфігурації залізобетонного ригеля-зразка для випробування

Таблиця 3.4. Склад бетонної суміші для виготовлення залізобетонних ригелів-зразків для випробувань

Назва компоненту суміші	Допустиме відхилення, кг	Кількість у пропорціях на 1 м ³ , кг
Щебінь гранітний	10	1150
Пісок кварцовий річкової	10	660
Вода водопровідна	10	165
Портландцемент марки «400»	10	460

Зразки для випробувань виготовлялися за типовою технологією заводів-виробників конструкцій даного типу. Коли виготовляли залізобетонні ригелі-зразки для випробувань були передбачені глухі отвори для термопар відповідно до схеми, що побудована для інтерполяції температур у їхніх перерізах. Бетон у опалубочних формах зразків ущільнювався на вібростендах. Сушіння та твердіння зразків відбувалося на повітрі протягом 28 діб та всередині приміщення, призначеного для зберігання зразків ПКЗ-2 за показників температури $20^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$ та вологості $55\pm 2\%$. На початку випробування було перевірено зразок на відповідність технічним вимогам.

Також з цієї бетонної суміші були виготовлені зразки-куби для визначення міцності зразка за методикою відповідно до ДСТУ Б В.2.7-214:2009 разом із ригелями-зразками для випробування. Для формування

зразків-кубів використовувалися стандартні форми, які зображені на рис. 3.8.



Рисунок – 3.8. Форма кубів 2 ФК-100

Бетон заливали у форми, після чого ущільнювали на вібростолі ВМ-6.4 (80кг/2900/0,35...0,55), зазначених у роботах [110 – 112].

Надалі зразки витримували в сушильній шафі СНОЛ 3,5.35.3,5/3М протягом 28 діб.

Означені дослідження виконували для дослідження відповідності класу міцності бетону. Для виконання армування зразків була застосована арматура виробника ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». У табл. 3.5 наведені технічні характеристики арматури та бетону, згідно із технічними характеристиками зразків для випробувань.

Таблиця 3.5. Технічні характеристики наповнюючих елементів залізобетонних ригелів-зразків для випробувань

Найменування	Клас	Параметри	Властивості
Арматура $d_3 = 6$ мм	A240C	Площа поперечного перерізу 28,3 мм ² Міцність – 240 МПа	арматурна сталь
Арматура $d_2 = 12$ мм	A400C	Площа поперечного перерізу 113,1 мм ² Міцність – 400 МПа	термомеханічно-зміцнена арматурна сталь
Арматура $d_1 = 20$ мм	A400C	Площа поперечного перерізу 314,2 мм ² Міцність – 400 МПа	термомеханічно-зміцнена арматурна сталь
Бетон важкий	C30/35 (B30)	Кубікова міцність – не менше за 30 МПа	рядовий, гідротехнічний

3.2.2. Розташування термопар у залізобетонному ригелі-зразку для високотемпературних випробувань

На рис. 3.9 представлена схема розташування термопар під час випробування у перерізі залізобетонного ригеля-зразка. Запроваджена схема встановлення термопар має задовольняти вимоги стандартів ДСТУ Б В.1.1-4-98* Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги [42] та ДСТУ Б В.1.1-13:2007 Захист від пожежі. Балки. Метод випробування на вогнестійкість[43].

Термопари розташовані таким чином, щоб можна було застосувати методи інтерполяції, що описані у попередньому розділі [44].

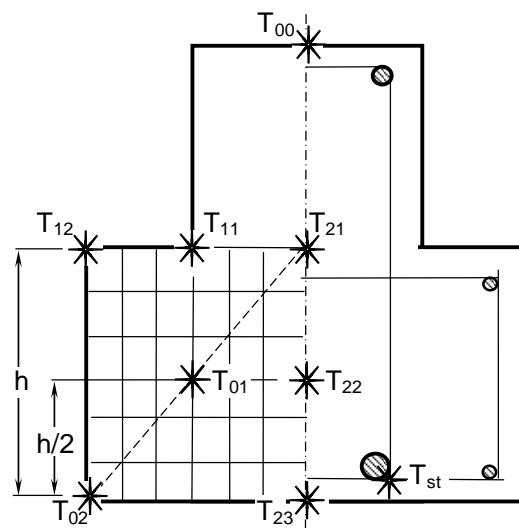


Рисунок – 3.9. Схема розташування термопар у перерізі залізобетонного ригеля-зразку для випробувань

За описаною методикою були виготовлені залізобетонні ригелі-зразки, що зображенні на рис. 3.10.



Рисунок – 3.10. Вигляд фрагменту залізобетонного ригеля-зразка для випробувань

На рис. 3.10 видно канали проходження дротів термодатчиків у перерізі досліджуваного ригеля-зразка. Для знімання показників температури з цих датчиків використовували інтерфейс програмного забезпечення. Він контролює температуру у робочому просторі вогневої печі, забезпечуючи температурний режим пожежі.

3.3. Методика високотемпературних випробувань залізобетонних ригелів-зразків

3.3.1. Методика підготовки обладнання та залізобетонних ригелів-зразків до високотемпературних випробувань

При підготовці кожного зразку до випробувань останній має бути шарнірно закріплений на стінках печі, у відповідності до п.7.3 ДСТУ Б В.1.1-13:2007, як це показано на рис. 3.1. На полицях ригелів були встановлені залізобетонні плити, що перешкоджають виходу гарячих газів з вогневої печі. Отвори та щілини між стінками печі та плитами були ізольовані цегляною кладкою та шаром мінеральної вати густиною 120

кг/м³ та завтовшки 120 мм. Отвори оглядових люків були закриті пінобетонними плитами густиною 450 кг/м³ та товщиною 150 мм.

3.3.2. Методика виконання високотемпературних випробувань

Випробування здійснювалося при показниках температури 18^{±1}°C та відносної вологості повітря у приміщенні лабораторії 55%, що задовольняє вимоги [42, 43].

Виконання випробувань ригелів-зразків здійснювалося за методом, що регламентований [42, 43]. Метод випробувань ґрунтується на визначенні проміжку часу від початку експонування за температурним режимом до часу настання граничного стану з обігрівної сторони фрагменту зразка [42 - 43].

Час настання граничного стану конструкції визначаємо за формулою [42]:

$$t_{fr} = t_{mes} - \Delta t, \quad (3.1)$$

де: t_{fr} – час настання граничного стану елементу конструкції, хв;

t_{mes} – проміжок часу від початку вогневого випробування до досягнення граничного стану, хв;

Δt – похибка результатів випробування.

Похибку випробувань визначають за нижче вказаними формулами.

Для інтервалу часу від 0 до t_{mes} розраховують інтегральне значення A_f середньої температури T_f в камері печі під час вогневого випробування за виразом [20]:

$$A_f = \sum_{i=1}^n 0,5 (T_{fi} + T_{fi-1}) (t_i - t_{i-1}), \quad (3.2)$$

де: T_{fi} – значення середньої температури в камері печі, яка дорівнює часу t_i , °C;

i – номер стадії вимірювань середньої температури (відповідає часу t_i , якщо вимірювання температури проводять через 1 хв);

t_i – час i -го стадії вимірювання середньої температури;

n – номер стадії вимірювань, для якого $t_i = t_{mes}$.

Таким же чином визначають інтегральне значення A_s стандартної температури T_s для цього інтервалу часу за виразом:

$$A_f = \sum_{i=1}^n 0,5 (T_{si} + T_{si-1}) (t_i - t_{i-1}), \quad (3.3)$$

де T_{si} – значення стандартної температури, що дорівнює часу t_i , °C.

В роботі [20, 39, 40] наведена формула для розрахунку значень температури T_s залежності від часу.

Якщо $A_s \leq A_f$, то $t=0$.

Якщо $A_s > A_f$, то похибку Δt розраховують за формулою:

$$\Delta t = (0,015 t_{mes} + 3) (A_s - A_f) / (A_s - A_{min}), \quad (3.4)$$

де A_{min} – інтегральне значення, для інтервалу часу від 0 до t_{mes} , мінімально допустимої температури T_{min} , °C·хв.

Значення A_{min} розраховують аналогічно до формул(3.3) і (3.4):

$$A_f = \sum_{i=1}^n 0,5 (T_{mini} + T_{mini-1}) (t_i - t_{i-1}), \quad (3.5)$$

де T_{mini} – мінімально допустима температура T_{min} , °C.

Температуру T_{min} відповідає часу t_i . Її розраховують за формулою:

$$T_{\min} = T (1 - |0,01d|), \quad (3.6)$$

де d – граничний відхил величини середньої температури у просторі вогневої печі для температур $T_s, \%$.

За результатами міцнісного розрахунку визначається момент настання граничного стану.

В роботі [42] наведені залежності для визначення відхилення. Випробування було здійснено для двох зразків-близнюків фрагментів залізобетонних ригелів.

Вертикальні деформації зразків визначали у двох точках по одній з кожного краю зразка. Додатково вимірювались всі значення горизонтальні деформації, величина яких була більше за 5 мм, в центрі зразка. Також вимірювались деформації точок посередині вертикального краю зразка завбільшки 50 мм від краю.

Вогневе випробування зупинялося за умови фіксації одного з граничних станів, а саме за ознакою втрати несучої здатності. Фіксація ознак граничного стану встановлюється згідно з вимогами стандартів [42, 43]. Величина критичних значень вертикальних переміщень розраховувалася за формулами (1.2) і (1.3). За результатами розрахунків були отримані такі значення: граничне значення швидкості наростання вертикальної деформації – 9,6 мм/хв, поздовжнє зміщення навантаженого кінця зразка становить 32 мм.

3.4. Адекватність результатів інтерполяції температурного розподілу у перерізі залізобетонного ригеля

Форма ригеля, що досліджується, є відмінною від прямокутної. Однак, для ригеля такої форми можна використати запропонований нами підхід з метою інтерполяції температурного поля у його перерізі. Для цього використали рівняння теплопровідності та ГУ III роду (2.6) – (2.10),

теплофізичні характеристики (2.11), (2.12) та вирази апроксимації рівняння теплопровідності та граничних умов методом скінчених елементів [113 – 122]. Також були використані відповідні значення коефіцієнтів ГУ III роду за формулами (1.7) – (1.12). Для вирішення цього завдання була створена скінченно-елементна схема, вигляд якої представлений на рис. 3.12.

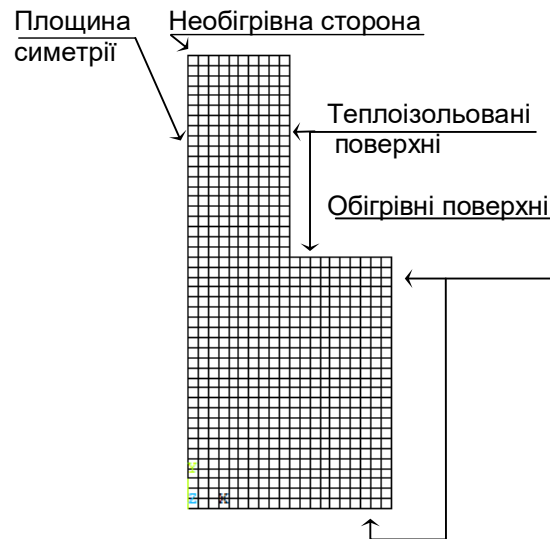


Рисунок – 3.11. Скінченно-елементна схема досліджуваного залізобетонного ригеля

Після проведення обчислень були отримані температурні розподілення, які зображені на рис. 3.13.

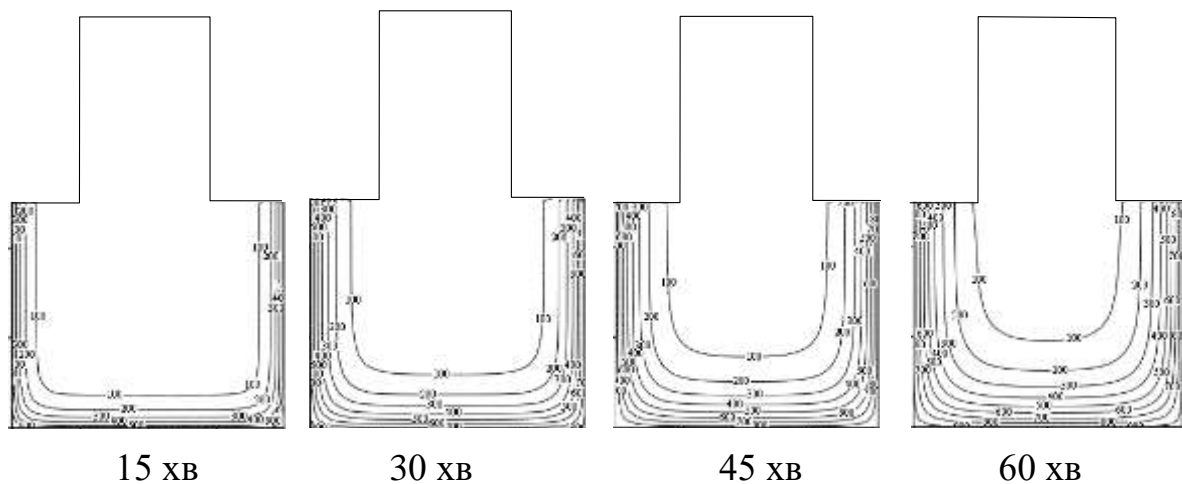


Рисунок – 3.12. Температурні розподіли у залізобетонному ригелі, визначені у результаті розрахунку (°C)

На рис. 3.12 видно, що для такого температурного розподілення можна застосувати підхід щодо інтерполяції температур описаний у попередньому розділі даної роботи.

Для виконання інтерполяції температурних розподілень у перерізі залізобетонного ригеля використано як початкові дані результати розрахунку у контрольних точках перерізу ригеля, що показані на рис. 3.9. Розраховані температурні дані наведені на рис. 3.13.

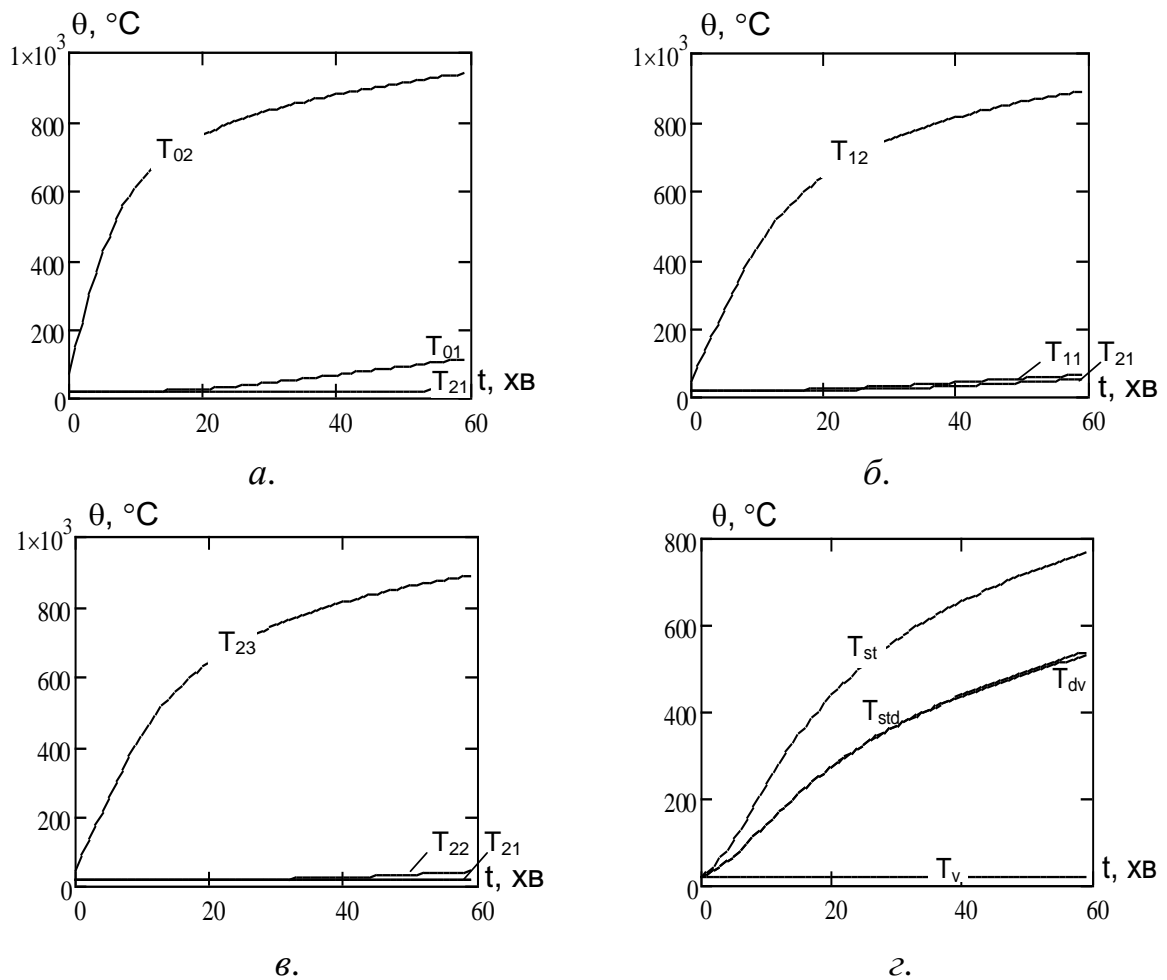


Рисунок – 3.13. Температурні режими за різними контрольними лініями у контрольних точках перерізу ригеля: *а* – за серединною вертикаллю; *б* – за горизонталлю; *в* – за головною діагоналлю; *з* – температура в арматурі

Використовуючи розроблені алгоритми, була виконана інтерполяція температурних розподілів для залізобетонного ригеля 300×150 мм з

важкого бетону на гранітному заповнювачі із використанням даних, які зображені на рис. 3.13.

На рис. 3.14 подані залежності показників ступеня апроксимаційної функції (2.1) від часу експонування зразка під впливом стандартного температурного режиму випробування.

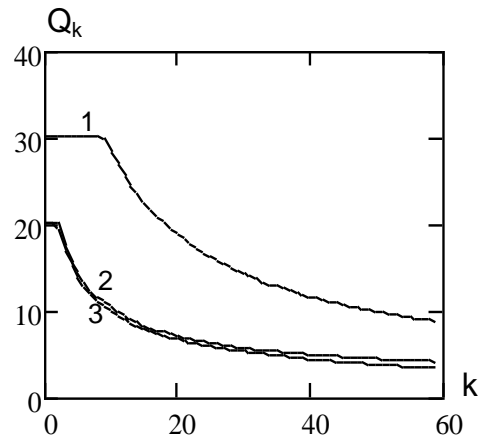


Рисунок – 3.14. Залежності показника ступеня наближуючого функціонала типу (2.1) для різних ліній контролю: 1 – за вертикаллю посередині перерізу; 2 – за діагоналлю перерізу; 3 – за горизонталлю посередині перерізу

Проміжкові дані, отримані у результаті розрахунку для 30 хв розвитку пожежі при інтерполяції за запропонованим способом наведені у табл. 3.6.

Таблиця 3.6. Основні проміжкові дані, отримані при інтерполяції температурного розподілення у залізобетонному ригелі

Номер вузлової точки головної діагоналі	Початковий параметр по вісі, x_0 , м	Початковий параметр по вісі, y_0 , м	Довжина відрізка по головної діагоналі до вузлової точки d_0 , м	Показник ступеня Функціоналу апроксимації, m	Температура першої ізотерми, T_{0k} , °C	Температура другої ізотерми, T_{0k+1} , °C
1	0,013	0,032	0,013	1,122	20,02	20,305
2	0,024	0,05	0,026	1,329	20,305	20,307
3	0,033	0,065	0,038	1,529	20,307	20,321

Продовження табл. 3.6

Номер вузлової точки головної діагоналі	Початковий параметр по вісі, x_0 , м	Початковий параметр по вісі, y_0 , м	Довжина відрізка по головної діагоналі до вузлової точки d_0 , м	Показник ступеня Функціоналу апроксимації, m	Температура першої ізотерми, T_{0k} , °С	Температура другої ізотерми, T_{0k+1} , °С
4	0,043	0,079	0,051	1,731	20,321	20,375
5	0,052	0,091	0,064	1,941	20,375	20,522
6	0,06	0,102	0,077	2,163	20,522	20,854
7	0,069	0,112	0,09	2,4	20,854	21,512
8	0,077	0,122	0,102	2,658	21,512	22,693
9	0,085	0,132	0,115	2,94	22,693	24,663
10	0,093	0,141	0,128	3,252	24,663	27,772
11	0,101	0,15	0,141	3,601	27,772	32,457
12	0,109	0,159	0,154	3,996	32,457	39,261
13	0,117	0,167	0,166	4,447	39,261	48,839
14	0,124	0,175	0,179	4,97	48,839	61,976
15	0,132	0,183	0,192	5,585	61,976	79,59
16	0,139	0,191	0,205	6,319	79,59	102,751
17	0,147	0,198	0,218	7,214	102,751	132,69
18	0,154	0,206	0,231	8,332	132,69	170,812
19	0,161	0,213	0,243	9,49	170,812	218,706
20	0,168	0,22	0,256	10,119	218,706	278,16
21	0,176	0,227	0,269	10,562	278,16	351,172
22	0,183	0,234	0,282	10,943	351,172	439,96
23	0,19	0,24	0,295	11,294	439,96	546,979
24	0,197	0,247	0,307	11,631	546,979	674,929
25	0,204	0,254	0,32	11,959	674,929	826,771

Аналіз даних табл. 3.6 показав, що їхній характер збігається з описанням п. 2.1.3 цієї роботи.

Після виконання обчислень були отримані температурні розподілення, які подані на рис. 3.16. Дані на рис. 3.15 показують достатню збіжність між вихідними та розрахованими даними. З поверхонь розподілень температури можна побачити, що інтерполяція, що виконана

за запропонованим способом, дає задовільні результати. Аналіз форм отриманих поверхонь показує їхню помітну розбіжність. Ізотерми, отримані шляхом інтерполяції, є менш заокругленими ніж ізотерми розподілень, визначених прямим розрахунком. В цьому випадку запропонований підхід дає точне наближення, проте є розриви за першою та другою похідними по поверхні температурних розподілів. Для аналізу було порівняно початкові дані, тобто дані, що отримані за теоретичного підходу і відповідні результати інтерполяції, що отримані за запропонованим методом. Результати порівняльного аналізу подані у табл. 3.7.

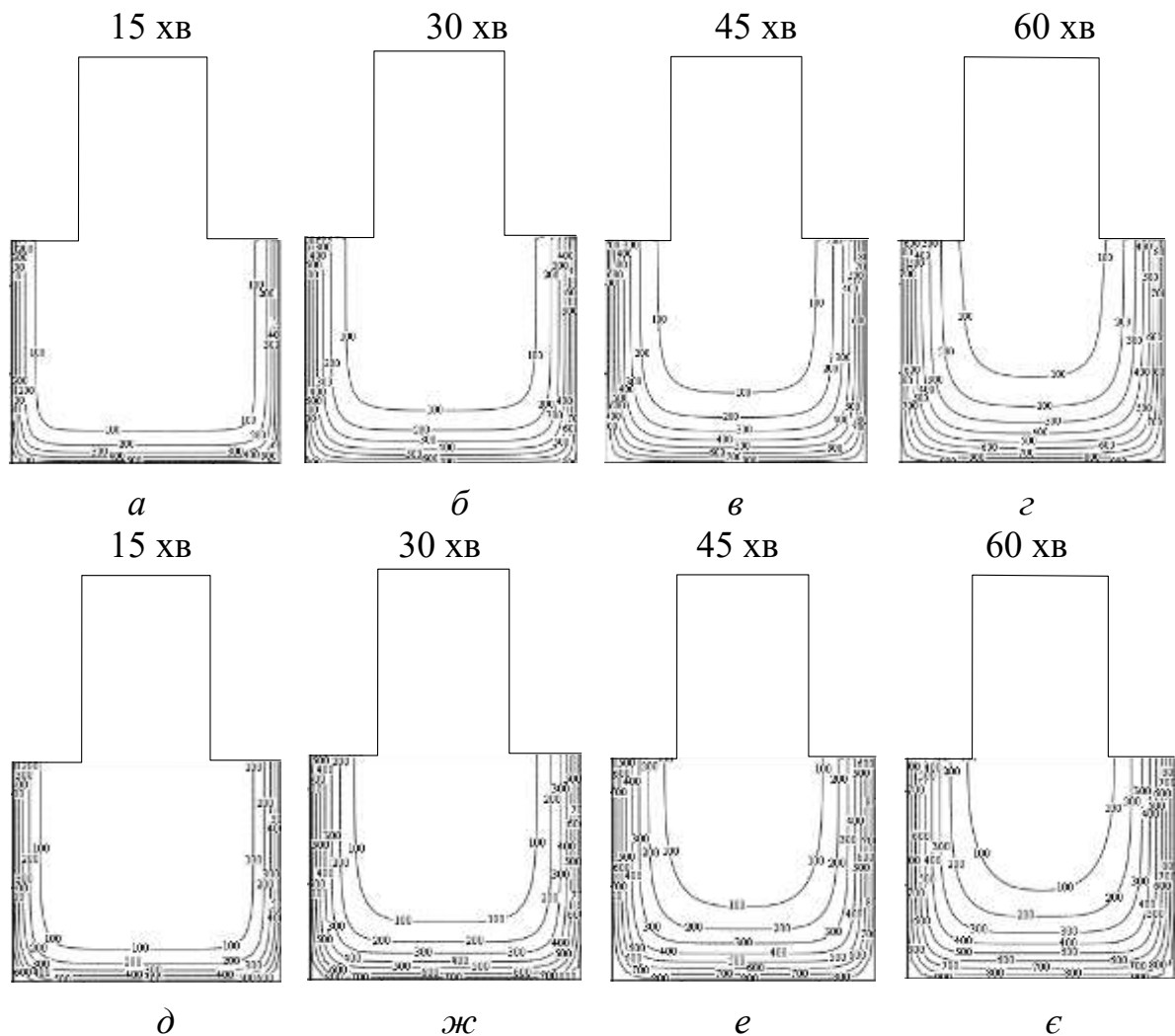


Рисунок – 3.15. Температурні розподіли у залізобетонному ригелі: *а* – 15 хв, *б* – 30 хв, *в* – 45 хв, *г* – 60 хв (за тепловим розрахунком); *д* – 15 хв, *ж* –

30 хв, $e - 45$ хв, $e - 60$ хв (за результатами інтерполяції, що отримані за запропонованим методом)

Таблиця 3.7. Дані порівняльного аналізу результатів інтерполяції, отриманих різними способами

Найбільше відхилення, °С	Середня відносна похибка, %	Середньоквадратична похибка, °С
45	7,6	15,4

Дані табл. 3.7 свідчать про високу точність методу інтерполяції. Для досліджуваного ригеля розроблений метод можна використовувати для виконання наближення температурних розподілень за дискретними значеннями вимірних температур у контрольних точках, де встановлено термопари за схемою, що наведена на рис. 3.10. Висока точність результатів інтерполяції також показує ефективність обраної схеми розташування температурних датчиків у перерізах досліджуваних ригелів.

3.5. Висновки до розділу

Узагальнюючи виконану роботу, можна підсумувати наступне:

1. Проведено вогневе випробування двох зразків-близнюків серійних залізобетонних ригелів марки Р2-72-26 серії ИИ 04-3 випуск 3 з важкого бетону на гранітному заповнювачі (щебенях). Клас міцності зразків С 30/35 (В30) з робочою арматурою класу А400С діаметром 20 мм та 12 мм, та додатковою А240С діаметром 6 мм.

2. Визначено кількість та схему розташування температурних датчиків у перерізі, що передбачає розміщення не менше 3-х термопар на кожній контрольній лінії перерізу залізобетонних ригелів.

3. Описано методику виконання вогневих випробувань, що ґрунтується на визначенні проміжку часу від початку експонування за температурним режимом до часу настання граничного стану.

4. Виконано інтерполяцію температурних розподілень на основі початкових даних, отриманих за допомогою розв'язання задачі теплопровідності, результати якої є адекватними, оскільки мають щонайбільшу похибку 7,6 % для запропонованого методу інтерполяції.

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОВЕДІНКИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ РИГЕЛІВ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

4.1. Результати високотемпературних випробувань залізобетонних ригелів - зразків

4.1.1. Результати попередніх досліджень міцності бетону залізобетонних ригелів-зразків

Під час застосування стандартної методики випробувань міцності бетону, що описана у роботі [118], були визначені механічні характеристики бетону, з якого виготовлені зразки для випробування. Процес виконання випробувань показаний на рис. 4.1.



Рисунок – 4.1. Вигляд стандартного кубічного бетонного зразка після випробувань на міцність

У процесі випробувань постійно вимірювали деформації та прикладену силу і будували діаграми деформування. Побудовані діаграми для зразків, що були піддані випробуванням, наведені на рис. 4.2.

В табл. 4.1 надані дані щодо кубової міцності зразків. Також у цій таблиці подані отримані відхилення кубової міцності.

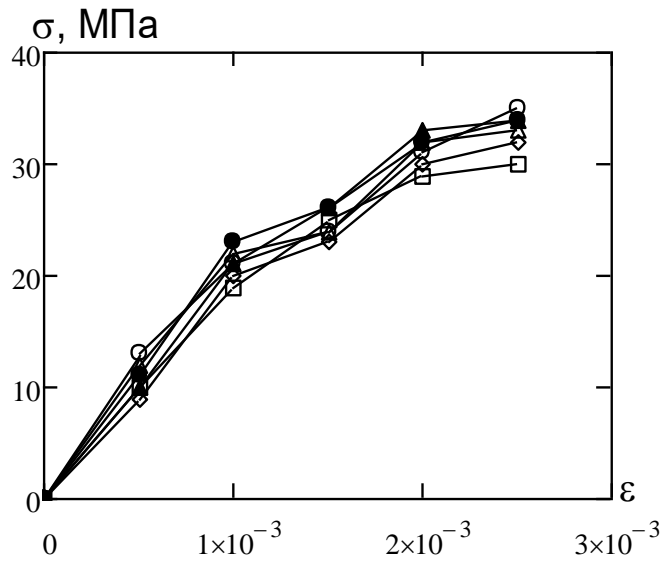


Рисунок – 4.2. Діаграми деформування шести випробуваних бетонних зразків-кубів

Таблиця 4.1. Результати механічних випробувань зразків з бетону

№ зразку	Модуль пружності, $E_b \times 10^4$ МПа	Кубікова міцність бетону, f_{cd} , МПа	Відповідний клас міцності бетону	Імовірність вимірювання міцності, %
1	1,6	36	C30/35	100
2	1,667	32	C30/35	100
3	1,6	34	C30/35	100
4	1,533	35	C30/35	100
5	1,733	36	C30/35	100
6	1,733	35	C30/35	100

Дані табл. 4.1 свідчать, що бетон, застосований для виготовлення залізобетонних ригелів-зразків для випробування, має клас міцності C 30/35 (B30).

Густина бетону, з якого були виготовлені бетонні зразки-куби, була визначена під час гідростатичного зважування. Бетон такої густини був застосований для виготовлення залізобетонних ригелів-зразків, підданих випробуванням. Вимірювання густини показали, що середня густина бетону кубічних зразків має $2312,2 \text{ кг/м}^3$, що відповідає технічним умовам, наведеним у табл. 3.3 цієї роботи.

4.1.2. Результати високотемпературних випробувань залізобетонних ригелів

За методикою, що описана у попередньому розділі, були виконані випробування щодо нагрівання у печі двох залізобетонних ригелів-близнюків, що є зразками для випробувань.

Випробувані зразки були візуально оглянуті, на них були виявлені ушкодження як результат теплової дії у печі установки для випробувань. Водночас, внаслідок нерівномірного температурного розширення цементного каменю та дії тиску пари у порах бетону, обидва зразки мали ушкодження у вигляді розвиненої системи тріщин, сколювань, каверн. По поверхні ригелів спостерігалось відколювання шару бетону. Поверхня бетону залізобетонних ригелів-зразків мала сліди вологи, яка випаровувалася з поруватої структури бетону. Також спостерігалися одиничні ушкодження та каверни, які зумовлені локальними дефектами у структурі бетону.

Результати вимірювання температури у просторі печі відповідно до схеми на рис. 3.6 показані на рис. 4.3.

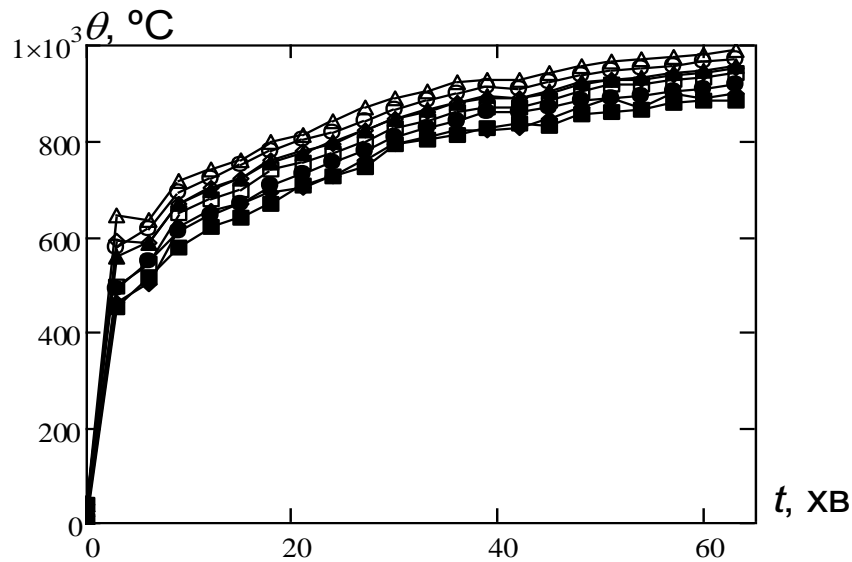


Рисунок – 4.3. Показники термопар у камері печі: □□□ – показники 1 термопар; ○○○ – показники 2 термопар; △△△ – показники 3 термопар; ◇◇◇ – показники 4 термопар; ◆◆◆ – показники 5 термопар; ●●● – показники 6 термопар; ■■■ – показники 7 термопар; ▲▲▲ – показники 8 термопар

Графіки, зображені на рис. 4.3, вказують на те, що були створені умови експерименту, які відповідають вимогам стандартів [42, 43]. Температура у просторі вогневої печі достатньо рівномірно розподілена. Для визначення відповідності температурного режиму у печі до стандартного температурного режиму пожежі згідно із вимогами норм [42, 43] застосовують середнє значення температури за даними всіх температурних датчиків у камері вогневої печі.

На рис. 4.4 показана залежність середньої температури від часу експонування ригелів разом із імовірною похибкою вимірювань термопар, яка допустима стандартами [42, 43].

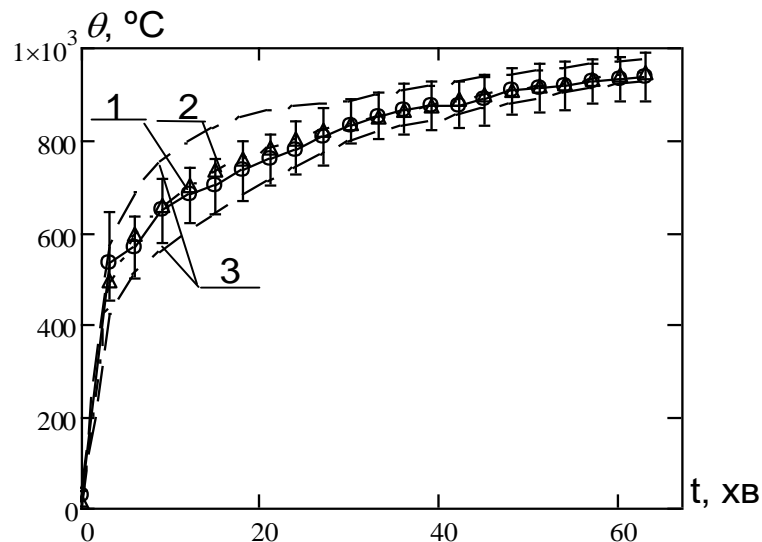


Рисунок – 4.4. Температурний режим випробувань залізобетонних ригелів-зразків в печі: 1 – крива середньої температури в вогневій печі, 2 – стандартна температурна крива, 3 – крива допустимих відхилень температурного режиму

Графік, наданий на рис. 4.4 показує те, що температурний режим випробувань не порушує вимог стандартів [42, 43] щодо високотемпературних випробувань залізобетонних балок і ригелів.

Комплекс вимірювань, виконаних під час високотемпературних випробувань, дав можливість визначення температури прогрівання у внутрішніх шарах ригелів-зразків у контрольних точках перерізів згідно із схемою, наведеною на рис. 3.10. На рис. 4.5 подані залежності температур у контрольних точках перерізів залізобетонних ригелів-зразків від часу випробувань.

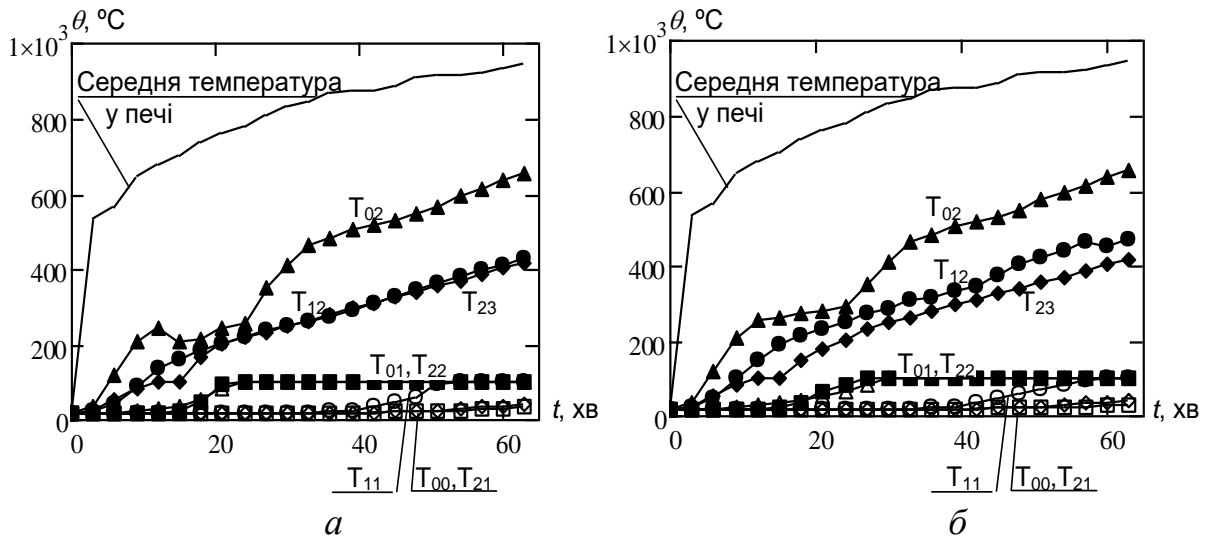


Рисунок – 4.5. Показники термопар у внутрішніх шарах досліджуваних елементів: (а) – залізобетонний ригель-зразок № 1, (б) – залізобетонний ригель-зразок № 2

На рис. 4.6 надані залежності температур на арматурі згідно зі схемою, наведеною на рис. 3.10.

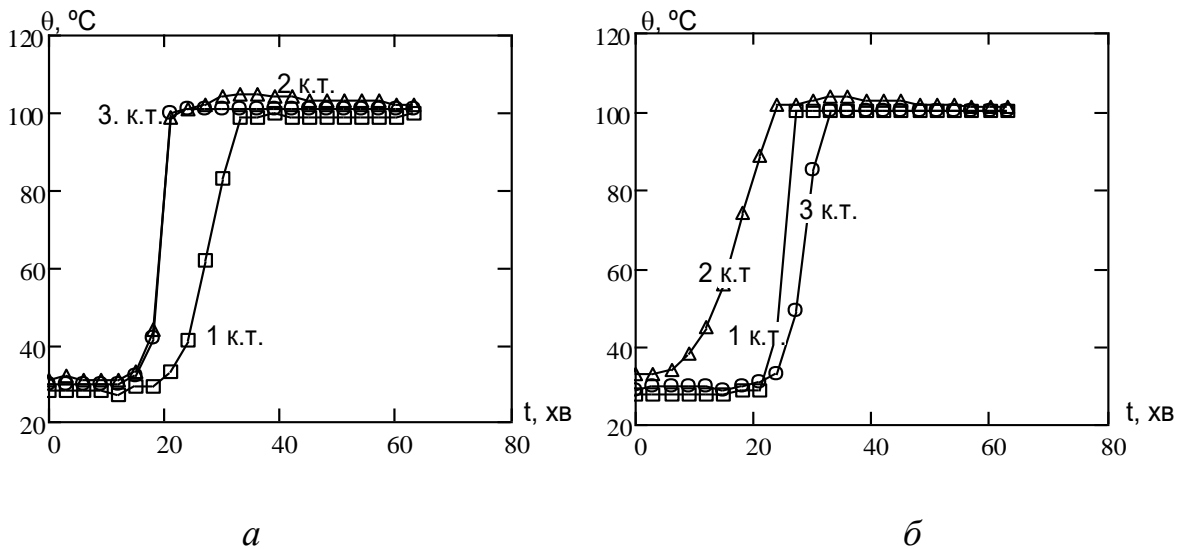


Рисунок – 4.6. Показники термопар на арматурі досліджуваних елементів, відповідно залізобетонних ригелів-зразків № 1 (а) та № 2 (б)

За методикою проведення випробувань температур на арматурі залізобетонних ригелів-зразків термопара розташована у трьох місцях по довжині ригеля. Перша контрольна точка розташована посередині ригеля,

а інші дві – посередині ділянок, що утворилися після поділу першою контрольною точкою. Наведені графіки є подібними, що вказує на відтворюваність експерименту.

Аналізуючи результати вимірювань, отриманих під час високотемпературних випробувань залізобетонних ригелів, наданих на рис. рис. 4.4 – 4.6, можна зазначити такі особливості. Під час випробувань настання стандартних граничних станів за теплової дії згідно із стандартами України [42, 43] щодо випробувань балок і ригелів не спостерігалось. Прогрівання внутрішніх шарів ригелів під час випробувань відповідає даним спостережень щодо цих процесів згідно із [42, 43]. В процесі вогневих випробувань залізобетонні ригелі мали незначний згин з боку палинкової системи печі у бік високотемпературного впливу. Температурні криві нагрівання внутрішніх шарів залізобетонних ригелів мають ділянку із сталим значенням температури. Вона пов'язана із випаровуванням вільної вологи у порах бетону і становить близько 100 °С .

Температури, які вимірювалися на обігрівній поверхні та у печі є подібними і не мають суттєво помітної розбіжності, що підтверджує достатню відтворюваність експериментальних даних високотемпературних випробувань. Це вказує на те, що обтікання поверхонь ригелів пічними газами та інтенсивне виділення пари з внутрішніх шарів бетону не спричиняє великих значень дисперсій експериментальних даних у висхідних точках і дозволяє використати отримані дані для дослідження аналізу адекватності результатів інтерполяції.

Також незначна розбіжність значень спостерігається під час вимірювання температур на арматурі.

На рис. 4.7 наведені результати вимірювань середніх температур від часу випробування з відповідними відхиленнями, які були отримані для контрольних точок у внутрішніх шарах залізобетонних ригелів-зразків, а на рис. 4.8 на арматурі.

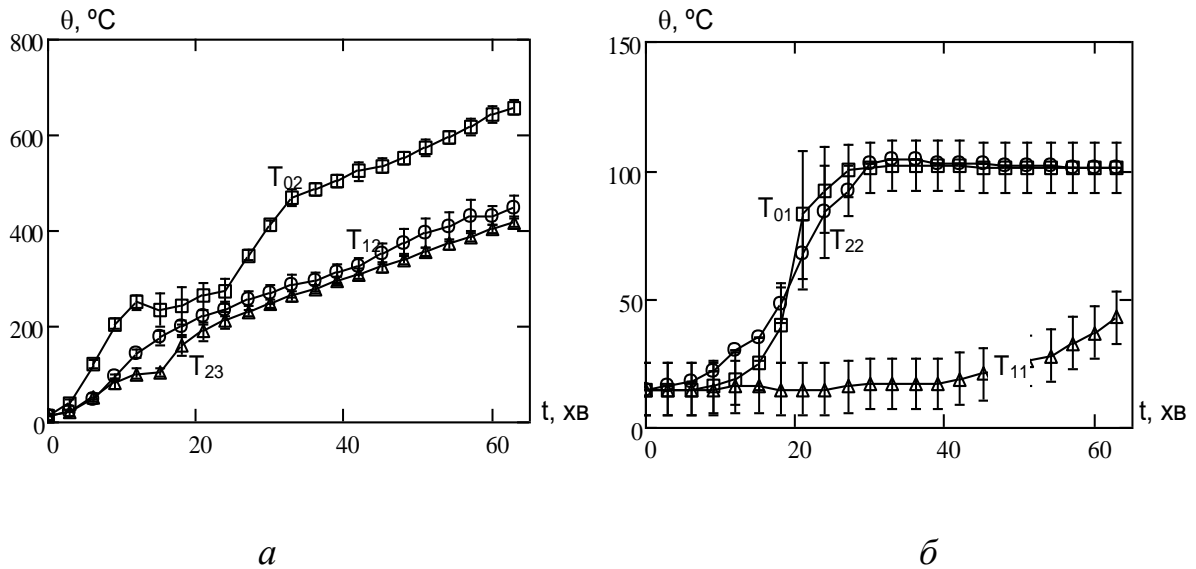


Рисунок – 4.7. Середня температура у контрольних точках згідно із схемою розташування термопар (див. рис. 3.9) перерізів залізобетонних ригелів-зразків під час випробувань із відхиленнями

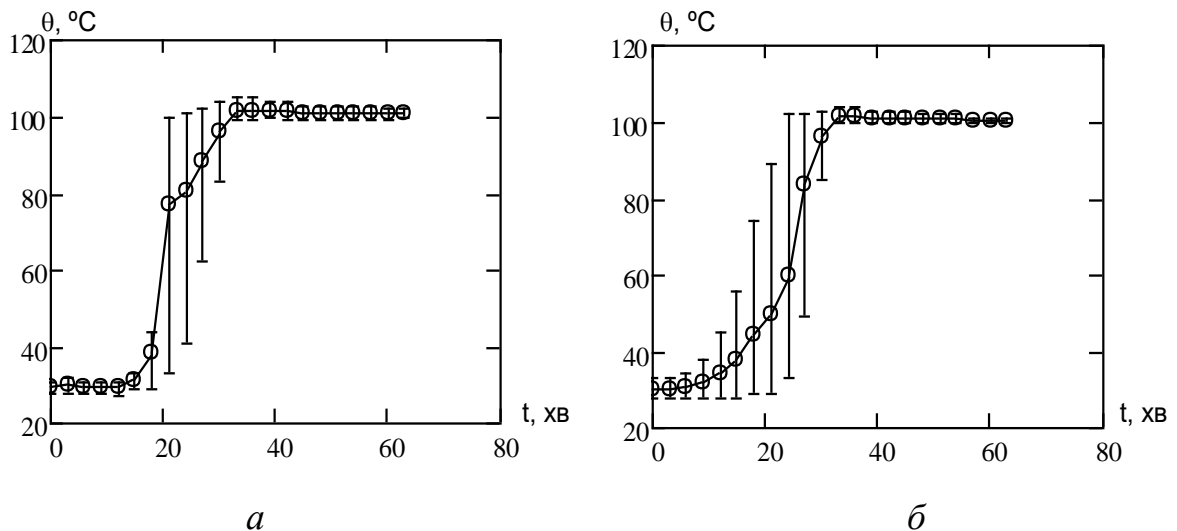


Рисунок – 4.8. Середня температура у арматурі згідно із схемою розташування термопар перерізів залізобетонних ригелів-зразків під час випробувань із відхиленнями

Аналізуючи графіки на рис. 4.7 та рис. 4.8, можна побачити, що найбільші відхилення виникають на інтервалі з 15 хв до 25 хв випробування. Це пов'язано з інтенсивним розтріскуванням та деструкцією бетону при прогріванні внутрішніх шарів зразків до високих

температур. Маючи вищеописану статистику вимірювань для двох залізобетонних ригелів фрагментів-зразків можна визначити статистичні показники результатів проведеного випробування. Як основний статистичний показник була визначена дисперсія відтворюваності за формулою [20, 84, 123]:

$$S_{cp}^2 = \frac{1}{d(n-1)} \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^d \left[\frac{y_{kj}^e - \bar{y}_k^e - \delta_{вим}}{\bar{y}_k^e} \right]^2, \quad (4.1)$$

де: $\delta_{вим}$ – допустима похибка вимірювання згідно з [84, 123];

y_{kj}^e – поточне експериментальне значення з вибірки.

У табл. 4.2 подані значення дисперсії температурних показників для контрольних шарів.

Таблиця 4.2. Параметри відтворюваності вимірювань температури у внутрішніх шарах бетону випробуваних залізобетонних ригелів

Параметр	Контрольна точка вимірювання температури						
	T ₀₁	T ₀₂	T ₁₁	T ₁₂	T ₂₁	T ₂₂	T ₂₃
Максимальне відхилення від середнього значення, °C	21,5	31,5	19,5	12	10,4	11	35,069
Середнє відносне відхилення від середнього значення, %	14,25	9,905	12,2	7,8	5,6	1,5	13,884
Дисперсія відтворюваності, S_{cp}^2	5,09	5,5244	4,65	6,73	2,33	1,36	17,7059

Дані табл. 4.2 вказують на деяку розбіжність результатів експерименту, однак, вона є допустимою у межах дійсної похибки. Дані

табл. 4.2 можуть бути використані для визначення адекватності результатів інтерполяції, що отримані для поданих результатів експерименту, з використанням розробленої методики інтерполяції.

У табл. 4.3 подані значення дисперсії температурних показників у арматурі для контрольних шарів.

Таблиця 4.3. Параметри відтворюваності вимірювань температури у арматурі випробуваних залізобетонних ригелів

Параметр	Зразок для випробування	
	№1	№2
Максимальне відхилення від середнього значення, °C	36	46
Середнє відносне відхилення від середнього значення, %	5,03	8,06
Дисперсія відтворюваності, S_{cp}^2	3,96	5,93

Дані табл. 4.2 та табл. 4.3 показують задовільну відтворюваність результатів вимірювання, що підтверджує їх достовірність.

4.2. Інтерполяція температур у перерізі залізобетонних ригелів за результатами високотемпературних випробувань

За результатами випробувань, що описані у попередньому пункті, за алгоритмами, що були описані у 2 розділі цієї роботи, була виконана інтерполяція температур. Вона виконувалася для відновлення температурного поля у перерізі досліджуваних залізобетонних ригелів, які піддавалися високотемпературним випробуванням.

На рис. 4.9 подані залежності показників ступеня апроксимаційної функції (2.1) від часу експонування зразка під впливом стандартного температурного режиму випробування.

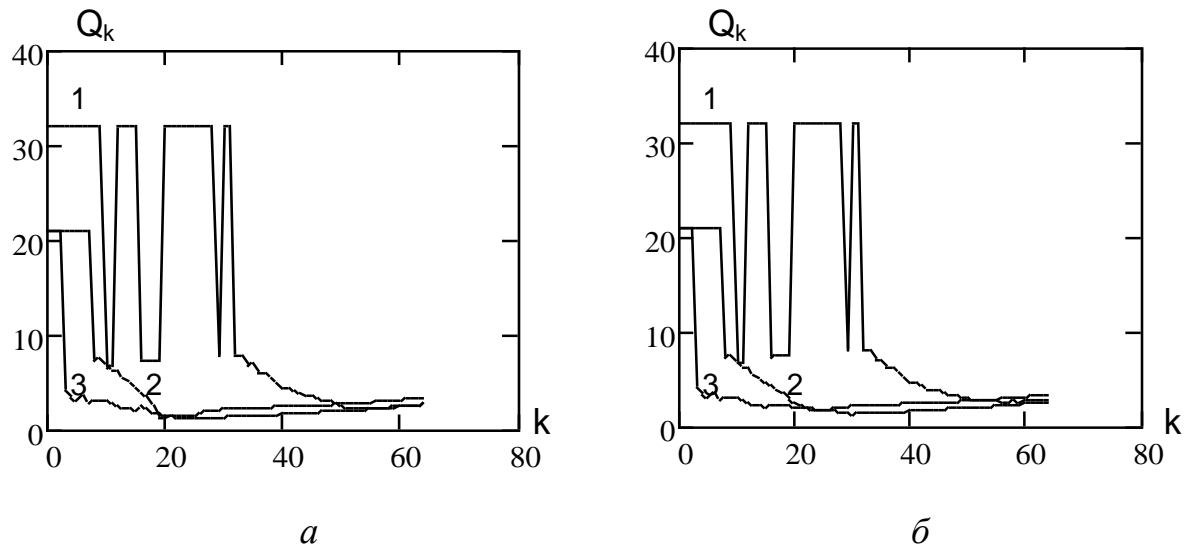


Рисунок – 4.9. Залежності показника ступеня апроксимаційного функціоналу типу (2.1) залізобетонних ригелів: *a* – зразок № 1; *б* – зразок № 2

Проміжні дані, що були отримані у результаті розрахунку для інтерполяції температурних розподілень у перерізі залізобетонного ригеля-зразка №1 за запропонованою методикою, наведені у табл. 4.4.

Таблиця 4.4. Основні проміжні дані, отримані в процесі розрахунку для 30 хв розвитку пожежі під час інтерполяції температурного розподілення у залізобетонному ригелі-зразку №1

Номер вузлової точки головної діагоналі	Початковий параметр по вісі, x_0 , м	Початковий параметр по вісі, y_0 , м	Довжина відрізка до вузлової точки по головній діагоналі, d_0 , м	Показник ступеня апроксимаційного функціоналу, m	Температура першої ізотерми, θ_{0k} , °C	Температура другої ізотерми, θ_{0k+1} , °C
1	0,0031	0,111	0,013	3,01	16,02	16,369
2	0,0082	0,133	0,026	3,01	16,369	17,639
3	0,014	0,148	0,038	3,01	17,639	19,918
4	0,021	0,16	0,051	3,01	19,918	23,273
5	0,029	0,17	0,064	3,01	23,273	27,751
6	0,038	0,178	0,077	3,01	27,751	33,391

Продовження табл. 4.4

Номер вузлової точки головної діагоналі	Початковий параметр по вісі, x_0 , м	Початковий параметр по вісі, y_0 , м	Довжина відрізка до вузлової точки по головній діагоналі, d_0 , м	Показник ступеня апроксимаційного функціоналу, m	Температура першої ізотерми, θ_k , °C	Температура другої ізотерми, θ_{k+1} , °C
7	0,047	0,186	0,09	3,01	33,391	40,225
8	0,057	0,192	0,102	3,01	40,225	48,281
9	0,067	0,198	0,115	3,01	48,281	57,584
10	0,077	0,204	0,128	3,01	57,584	68,156
11	0,088	0,209	0,141	3,01	68,156	80,017
12	0,1	0,214	0,154	3,01	80,017	93,186
13	0,111	0,219	0,166	15,0	93,186	107,681
14	0,123	0,223	0,179	15,0	107,681	123,517
15	0,136	0,227	0,192	12,14	123,517	140,709
16	0,149	0,231	0,205	9,43	140,709	159,271
17	0,162	0,235	0,218	8,09	159,271	179,217
18	0,175	0,239	0,231	7,34	179,217	200,56
19	0,189	0,242	0,243	6,91	200,56	223,31
20	0,203	0,245	0,256	6,69	223,31	247,481
21	0,217	0,248	0,269	6,61	247,481	273,082
22	0,232	0,252	0,282	6,67	273,082	300,125
23	0,247	0,255	0,295	6,85	300,125	328,619
24	0,262	0,257	0,307	7,2	328,619	358,574
25	0,277	0,26	0,32	7,8	358,574	390

Аналіз даних табл. 4.4 показав, що їхній характер також збігається з описом п. 2.1.3 цієї роботи. Можна помітити також суттєву розбіжність між даними, що отримані за початковими значеннями температур, визначеними теоретично та даними, що визначені за початковими експериментальними значеннями температур.

Після виконання інтерполяції за запропонованим методом були отримані температурні розподілення, які зображені на рис. 4.10.

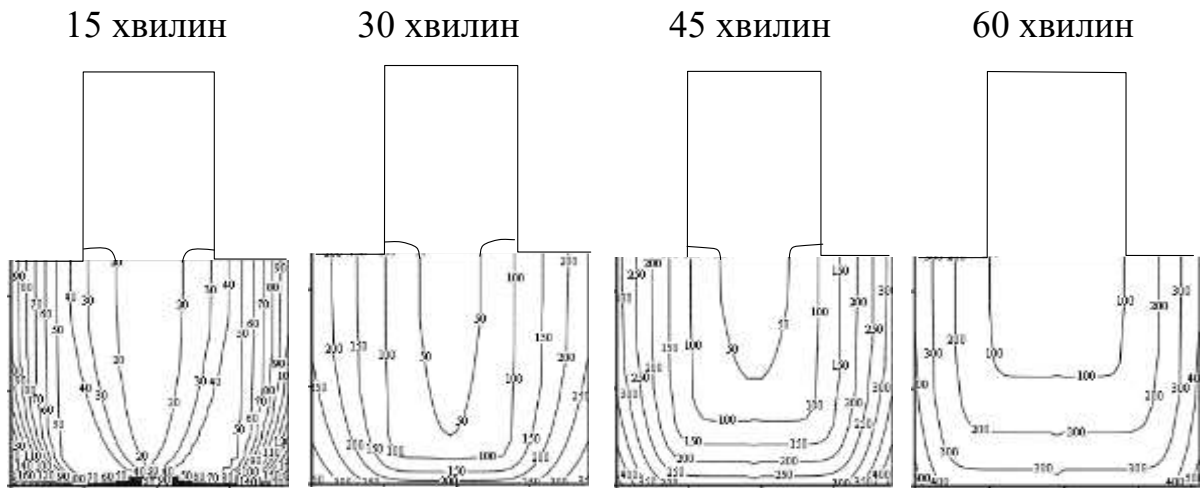


Рисунок – 4.10. Температурні розподіли у залізобетонному ригелі-зразку №1, визначені шляхом виконання інтерполяції

Ізотерми на рис. 4.10 показують, що результатами, отримані шляхом інтерполяції є адекватними, але є розриви за першою та другою похідними на поверхні температурних розподілів. При цьому детальний аналіз адекватності результатів в кожній контрольній точці залізобетонних ригелів-зразків був виконаний розрахунок F-критерію за формулою [20, 84, 123]:

$$F_c = \frac{S_{ad}^2}{S_{cp}^2} \leq F(v_1, v_2, \alpha), \quad (4.2)$$

де: S_{cp}^2 – дисперсія відтворюваності даних експерименту, визначаємо за формулою (4.1);

S_{ad}^2 – дисперсія адекватності;

$v_1 = n - 1$ – число ступенів вільності чисельника;

n – кількість вимірювання в одному експерименті;

$v_2 = d(n - 1)$ – кількість ступенів свободи знаменника;

d – кількість експериментів;

$\alpha = 0.05$ – рівень значущості.

Дисперсію адекватності визначаємо за формулою [20, 73]:

$$S_{ad}^2 = \frac{d}{n-1} \sum_{k=1}^n \left[\frac{\bar{y}_k^e - y_k}{\min(\bar{y}_k^e, |y_k|)} \right]^2, \quad (4.3)$$

де: y_k – поточне розрахункове значення;

\bar{y}_k^e – середнє значення вимірної величини за вибіркою.

Як окремий експериментальний випадок було встановлено випробування кожного із зразків-близнюків залізобетонних ригелів. Результати розрахунку наведені у табл. 4.5. Висновок про адекватність робили на основі розрахункового значення з табличним за рівнем значущості 0,05.

Таблиця 4.5. Статистичні параметри під час дослідження адекватності результатів апроксимації температурних розподілень у зразках

Кількість вимірювань в експерименті, n	Кількість експериментів, d	Число ступенів вільності чисельника, ν_1	Число ступенів вільності знаменника, ν_2	Дисперсія відтворюваності, $S_{\text{фр}}^2$	Дисперсія адекватності, S_{ad}^2	Розрахункове значення F-критерію	Табличне значення F-критерію [75]	Середнє відносне відхилення, %	Середньоквадратичне відхилення, °C
65	2	64	128	6,199	4,55	0,734	1,01	11,2	22.4

Дані табл. 4.5 показують, що результати, отримані за розглянутим способом інтерполяції є адекватними, оскільки значення критерію Фішера не перевищує табличного значення.

4.3. Ідентифікація коефіцієнтів зниження міцності бетону залізобетонних ригелів за результатами випробувань

Для ідентифікації коефіцієнтів зниження міцності бетону випробуваних залізобетонних ригелів був виміряний максимальний прогин залізобетонних ригелів-зразків. На рис. 4.11 зображені криві залежностей максимального прогину досліджуваних залізобетонних ригелів від часу випробування.

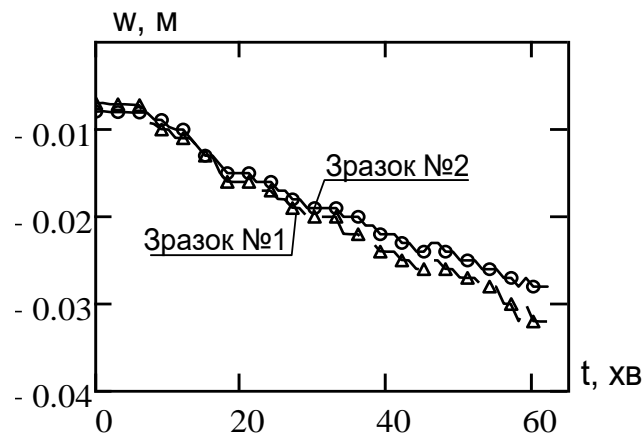


Рисунок – 4.11. Залежність найбільшого прогину зразків залізобетонних ригелів

На рис. 4.12 показана крива залежності значення середнього найбільшого прогину досліджуваних зразків залізобетонних ригелів із обчисленими відхиленнями.

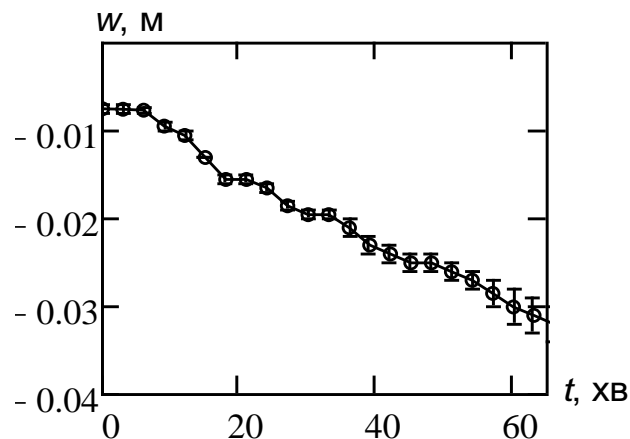


Рисунок – 4.12. Залежність величини середнього максимального прогину залізобетонних ригелів із відхиленнями

Аналізуючи графіки, наведені на рис. 4.11 та рис. 4.12, можна зазначити, що отримані результати, є адекватними. Межа вогнестійкості зразків залізобетонних ригелів не досягається оскільки величина максимального прогину та швидкості його зростання не перевищує допустимих значень, що становить відповідно $D = 35$ мм та $dD/dt = 1,54$ мм/хв [124 – 128].

Використовуючи отримані дані щодо інтерполяції температур у перерізах залізобетонних ригелів та математичний апарат (2.26) – (2.32), були ідентифіковані коефіцієнти зниження міцності бетону від температури, графіки залежності яких зображені на рис. 4.13.

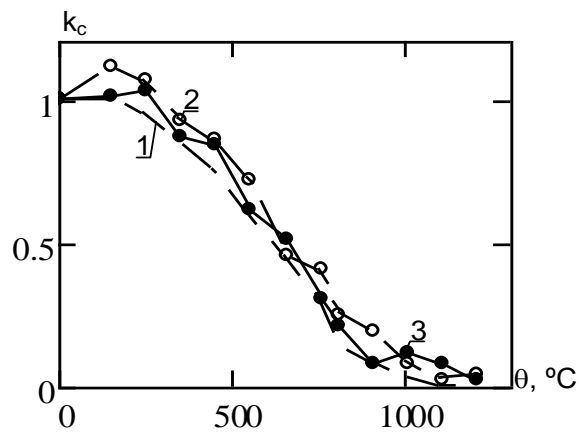


Рисунок – 4.13. Залежності коефіцієнта зниження міцності бетону: 1 – стандартна залежність, 2 – залежність для зразка № 1, 3 – залежність для зразка № 2

Аналіз кривих коефіцієнта зниження міцності бетону, наведених на рис. 4.13 показує, що залежність для зразків № 1 та № 2 істотно не відрізняються між собою. Це вказує на ефективність запропонованого метода ідентифікації механічних характеристик бетону. Середня відносна похибка не перевищує 7,2 %.

На рис. 4.14 наведена залежність значення коефіцієнту зниження міцності бетону усереднена для обох зразків залізобетонних ригелів із відхиленнями.

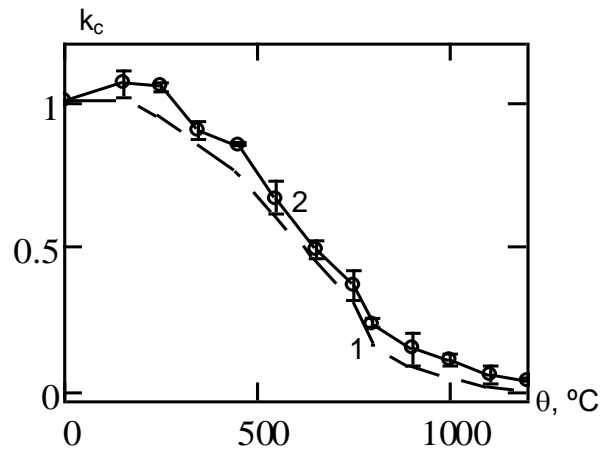


Рисунок – 4.14. Залежності коефіцієнта зниження міцності бетону: 1 – стандартна залежність, 2 – усереднена залежність для зразків № 1 та № 2 із відхиленнями

Графік на рис. 4.14 показує, що отримані коефіцієнти зниження міцності бетону відрізняються від рекомендованих у настанові [47] усередньому на 8 %. Таким чином, було отримано уточнену залежність коефіцієнта зниження міцності бетону для залізобетонних ригелів, що дозволить на 8 % підвищити точність методу розрахунку на вогнестійкість для елементів конструкцій цього типу [124 – 133].

Для аналітичного описання отриманої закономірності зниження міцності бетону залізобетонного ригеля, що випробовували, був здійснений регресійний аналіз. У результаті виконаного регресійного аналізу було отримано рівняння регресії, що описує отриману закономірність зниження міцності бетону залежно від температури. Воно має такий вигляд:

$$k_c(\theta) = 1 + 1.505 \cdot 10^{-3} \theta - 7.123 \cdot 10^{-6} \theta^2 + 6.655 \cdot 10^{-9} \theta^3 - 1.921 \cdot 10^{-12} \theta^4.$$

На рис. 4.15 зображений графік отриманої регресійної залежності, яка відтворює закономірність зниження міцності бетону досліджуваного залізобетонного ригеля залежно від температури.

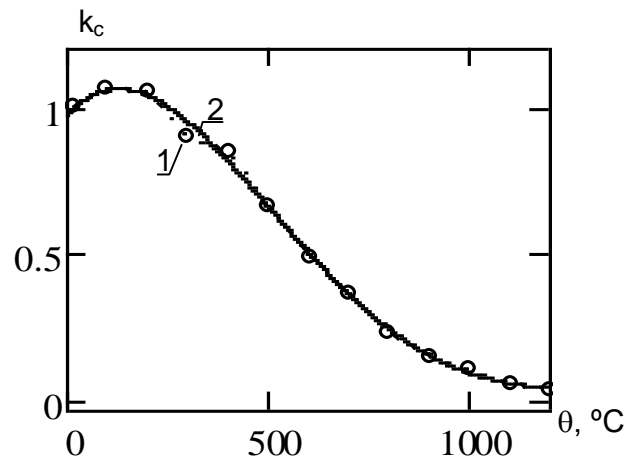


Рисунок – 4.15. Залежності коефіцієнту зниження міцності бетону: 1 – залежність отримана за запропонованим методом ідентифікації, 2 – крива, побудована за регресійною залежністю

Побудована регресійна залежність достатньо точно описує досліджувану закономірність коефіцієнта зниження міцності бетону залізобетонного ригеля залежно від температури.

4.4. Висновки до розділу

З огляду на виконані дослідження можна зробити такі висновки:

1. Виконано аналіз статистичних параметрів результатів високотемпературних випробувань залізобетонних ригелів та показано допустиму відтворюваність експериментів і відповідність їхніх умов вимогам чинних стандартів.

2. В результаті експерименту встановлено, що залізобетонні ригелі мають час настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності більший за час проведення вогневого випробування.

3. Використовуючи дані експерименту, виконано інтерполяцію температурного розподілу за розробленою методикою, у результаті якої з'ясовано, що використаний алгоритм є стійким і дає прийнятні результати, оскільки середнє відносне відхилення дорівнює 11,2 %.

4. Виконано оцінювання адекватності результатів інтерполяції за критерієм Фішера. Отримані результати є адекватними, адже розрахований критерій Фішера становить 0,734 та не перевищує табличного значення, що дорівнює 1,01.

5. В результаті аналізу ефективності методики інтерполяції за надійністю алгоритму, адекватністю результатів, гладкістю отриманих поверхонь температурних розподілень та наближенням розподілів температур до теоретичних уявлень з'ясовано, що запропонований метод інтерполяції є ефективним і може бути використаний для реалізації метода ідентифікації механічних характеристик бетону.

6. Отримано уточнену залежність коефіцієнта зниження міцності бетону для залізобетонних ригелів за результатами вогневого випробування, що дозволить на 8 % підвищити точність методу розрахунку на вогнестійкість для елементів конструкцій цього типу.

Отримано уточнену залежність коефіцієнта зниження міцності бетону для залізобетонних ригелів, що може бути описана регресійною залежність:

$$k_c(\theta) = 1 + 1.505 \cdot 10^{-3} \theta - 7.123 \cdot 10^{-6} \theta^2 + 6.655 \cdot 10^{-9} \theta^3 - 1.921 \cdot 10^{12} \theta^4.$$

РОЗДІЛ 5. ОБГРУНТУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ТА РИГЕЛІВ

5.1. Обґрунтування методу розв’язання задачі міцності для реалізації удосконаленого методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів

При оцінці часу фіксування настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності залізобетонних балок та ригелів за удосконаленим методом розрахунку на вогнестійкість необхідно скористатися схемою, яка показана на рис. 5.1.

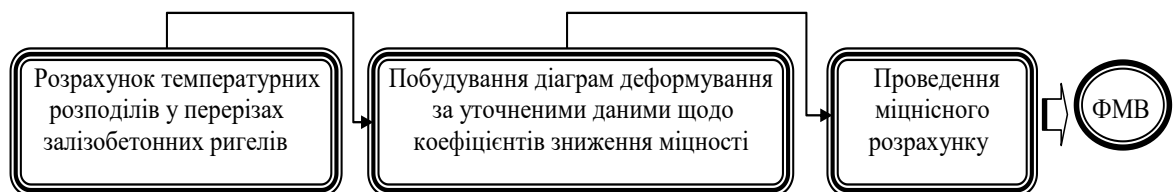


Рисунок – 5.1. Схема проведення удосконаленого методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів

Задачу міцності розв’язано на основі значення максимального прогину ригеля чи балки, що визначають за формулою [42, 43]:

$$D = \frac{L^2}{400 \cdot b} \cdot \quad (5.1)$$

За цим значенням максимального прогину визначаємо максимальну кривизну за формулою:

$$\chi = \frac{48D}{5L^2} = 24 \cdot 10^{-3} b^{-1}. \quad (5.2)$$

За відомими середніми значеннями температури кожної зони і температури арматурних стрижнів, найбільшою кривизною, а також координатами цієї зони і центра перерізу арматурного стрижня визначаємо середні напруження кожної із зон та арматурних стрижнів за рекомендованими EN 1992-1-2:2012 Єврокод 2 [47] діаграмами «напруження-деформація». На рис. 5.2 подані діаграми деформування бетону залежно від температури нагрівання. Їх побудовано за формулами (2.10) – (2.14). З врахуванням отриманої уточненої температурної залежності коефіцієнту зниження міцності бетону для розрахунку на вогнестійкість залізобетонних ригелів були побудовані відповідні діаграми деформації бетону за умови нагрівання. Побудовані діаграми зображені на рис. 5.2.

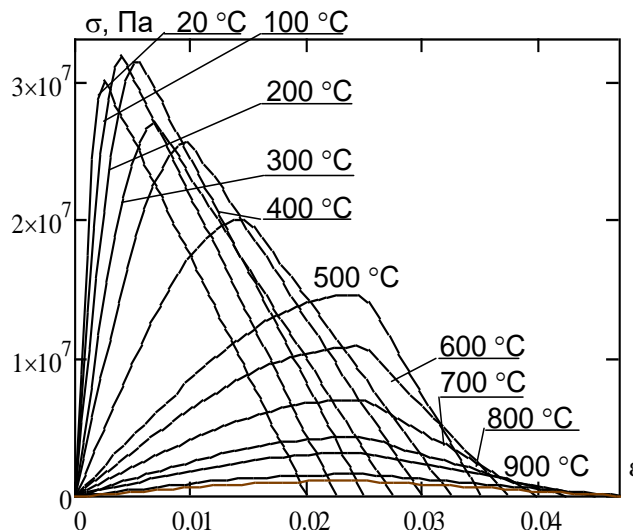


Рисунок – 5.2. Діаграми деформування бетону класу С 30/35

За відомими напруженнями кожної із зон перерізу та арматурних стрижнів визначено момент, за якого досягається критична кривизна ригеля з використанням формули [69, 133]:

$$M_{lim,fi} = \sum_{i=1}^z \sigma_{si}(\theta, \varepsilon_{si}) A_{si} \cdot \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{bi,j}(\theta, \varepsilon_{bi,j}) A_{bi,j} d_{bi,j} + \sum_{i=1}^l \sigma_{sdi}(\theta, \varepsilon_{sdi}) A_{sdi} d_{sdi}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{bi,j}(\theta, \varepsilon_{bi,j}) A_{bi,j} + \sum_{i=1}^l \sigma_{sdi}(\theta, \varepsilon_{sdi}) A_{sdi}}, \quad (5.3)$$

де: $\sigma_{bi,j}(\theta, \varepsilon_{bi,j})$ – напруження у бетоні, які визначаємо за формулою (2.11), для середнього значення температури поточної зони бетону у перерізі;

$\sigma_{si}(\theta, \varepsilon_{si})$, $\sigma_{sdi,j}(\theta, \varepsilon_{sdi,j})$ – напруження у робочій та додатковій арматурі, які визначаємо за формулами (2.13), (2.14);

$d_{bi,j}$, d_{sdi} – відстані, відповідно від центру зон бетону у перерізі, осей верхніх додаткових арматурних стрижнів до осі, що проводиться через центри робочих арматурних стрижнів, причому для арматури, розташованої нижче центральної вісі перерізу відстані мають негативне значення;

$\varepsilon_{bi,j} = \chi_{bi,j} \cdot \chi$, де $\chi_{bi,j}$ – відстань від центральних точок зон до горизонтальної центральної вісі перерізу;

$\varepsilon_{sdi} = \chi_{sdi,j} \cdot \chi$, де $\chi_{sdi,j}$ – відстань від центральних осей додаткових арматурних стрижнів до центральної осі перерізу;

$\varepsilon_{si} = \chi_{si,j} \cdot \chi$, де $\chi_{si,j}$ – відстані від осей робочих арматурних стрижнів до центральної осі перерізу;

$A_{bi,j}$ – площа зон, на які розбитий переріз;

A_{sdi} , A_{sdi} – площі поперечних перерізів арматурних стрижнів.

За формулою (5.3) побудовано графік залежності внутрішнього моменту від кривизни ригеля чи балки. При побудованні графіку встановлюється момент з найбільшим значенням, що розглядаємо як максимальний момент, який здатна витримувати балка у певний контрольний момент часу випробування.

За отриманими значеннями будується залежність максимального моменту від часу вогневого випробування. Порівняно поточне значення максимального моменту випробуваного ригеля із діючим моментом, що визначаємо за формулою:

$$M_{0d} = \frac{Q_{0d}L^2}{8}. \quad (5.4)$$

Формулу (5.3) застосовано з огляду на гіпотезу плоских перерізів з припущенням, що нейтральна лінія проходить через центр тяжіння перерізу ригеля. Для описання нерівномірності деформування балкового елемента із тріщинами застосовано підхід, що описаний в [98 – 102]. Цей підхід полягає у застосуванні середнього значення кривизни. Для цього визначено у кожний момент часу середню кривизну ригеля за формулою:

$$\chi_{m,t} = (\varepsilon_{bm,t} + \varepsilon_{sm,t}) \cdot h_0^{-1}, \quad (5.5)$$

де: $\varepsilon_{bm,t}$ – середня деформація бетону;

$\varepsilon_{sm,t}$ – середня деформація арматурних стрижнів;

h_0 – відстань між арматурними стрижнями та верхнім краєм перерізу ригеля.

Середні деформації бетону та арматурної сталі визначено згідно із рекомендаціями [113 – 118] за формулами:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{bm,t} &= \psi_b \varepsilon_b, \\ \varepsilon_{sm,t} &= \psi_s \varepsilon_s,\end{aligned}\tag{5.6}$$

де: коефіцієнт усереднення деформацій $\psi_b = \psi_s = 0.9$;

$\varepsilon_b, \varepsilon_s$ – деформації відповідно крайнього стиснутого шару бетону та розтягнутої арматури відповідно.

Таким чином, отримане значення кривизни ригеля та балки уточнено за формулами (5.5), (5.6).

5.2. Застосування удосконаленого методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонної балки із прямокутним перерізом в екстремальних умовах високих температур

Розглянуто конкретний приклад залізобетонної балки. На рис. 5.3 зображено переріз балки та схема її армування. Основні технічні параметри цієї балки наведені у табл. 5.1.

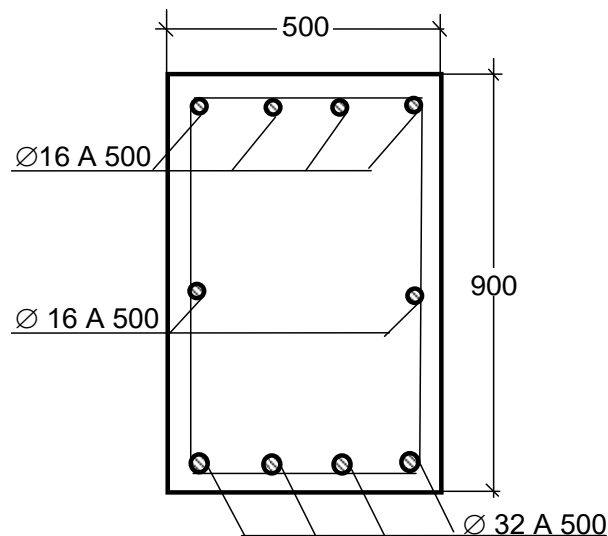


Рисунок – 5.3. Параметри перерізу залізобетонної балки тестової задачі

Таблиця 5.1. Основні параметри залізобетонної балки

Характеристика ригеля	Позначка	Величина	Од. виміру
ширина перерізу балки	a	0.5	м
висота перерізу балки	b	0.9	
ширина захисного шару у перерізі	w	0.03	
довжина з/б балки	L	4	
Вид бетону	Звичайний із гранітним заповнювачем	Клас міцн. С 30/35 (В30)	
Густина	ρ_c	2230	кг/м ³
Арматура: більший діаметр	d_1	0.032 А500С	м
менший діаметр	d_2	0,016 А500С	
Додаткова арматура: діаметр	d_3	0.016 А500С	м

Для розрахунку розподілів температур виконано тепловий розрахунок за допомогою розв'язування диференціального рівняння теплопровідності з використанням формул (2.1) – (2.4) за методом скінченних різниць. Отримані температурні розподіли наведені на рис. 5.4.

30 хвилин 60 хвилин 90 хвилин 120 хвилин 150 хвилин 180 хвилин

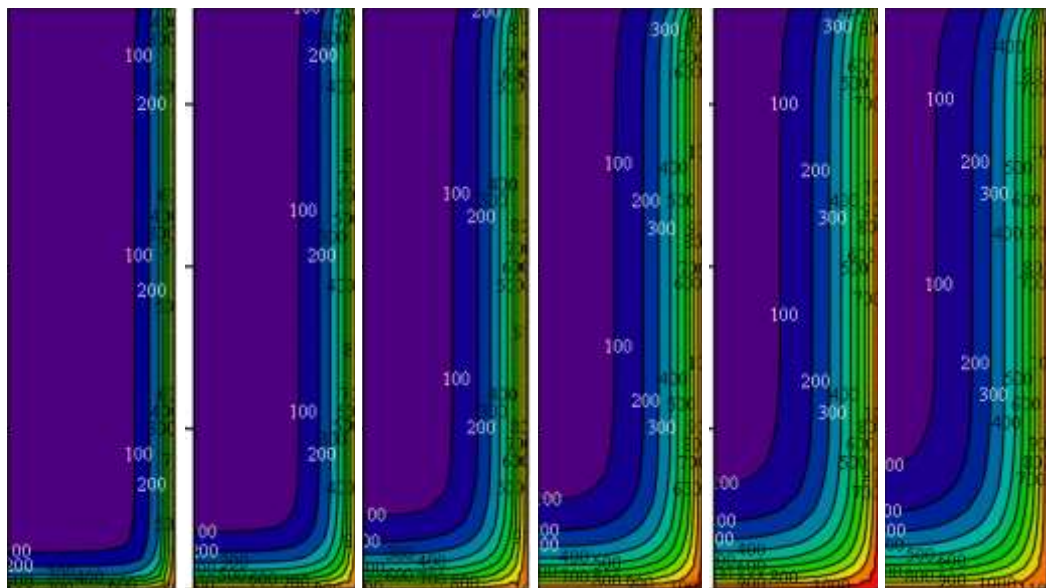


Рисунок – 5.4. Результати розв'язку теплової задачі для залізобетонної балки 500×900 мм

Згідно з рекомендаціями Єврокода 2 EN 1992-1-2:2012 [47], а також даними рис. 5.2 були обрані міцнісні характеристики бетону і арматурної сталі. Діаграми деформування арматурної сталі зображені на рис. 5.5.

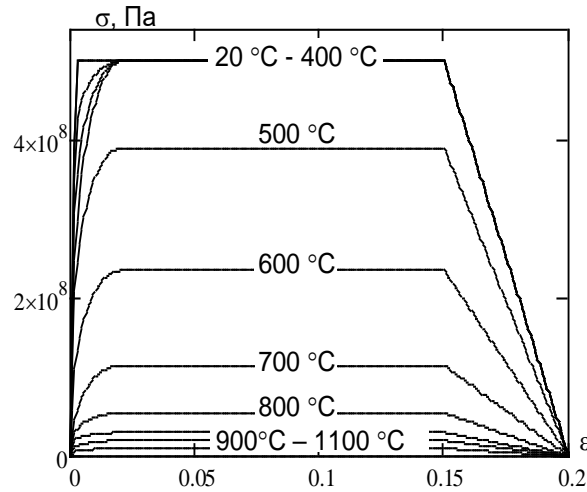


Рисунок – 5.5. Діаграми арматурної сталі

Переріз залізобетонної балки був дискретизований на прямокутні ділянки розмірами $5 \times 4,5$ мм.

Граничний максимальний прогин балки становить:

$$D = \frac{L^2}{400 \cdot b} = \frac{4^2}{400 \cdot 0,9} = 0,044 \text{ м,}$$

Гранична кривизна балки становить:

$$\chi = 24 \cdot 10^{-3} 0,9^{-1} = 0,0027 \text{ м}^{-1}$$

За формулою (5.3) побудовані графіки залежності внутрішнього моменту від кривизни балки у кожний контрольний момент часу і визначені їхні максимальні значення. На рис. 5.6 побудовані вказані графіки для деяких моментів часу випробування.

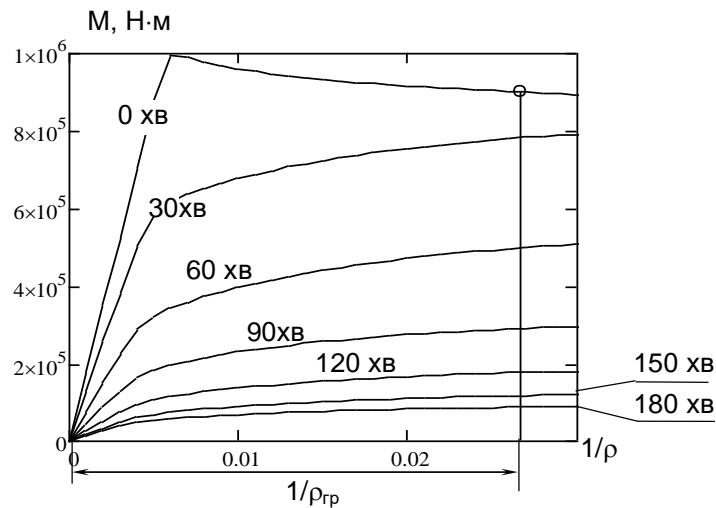


Рисунок – 5.6. Графіки моменту за граничного значення кривизни для заданих моментів часу випробування

На рисунку 5.7 побудований графік зниження несучої здатності залізобетонної балки на основі отриманих значень максимальних моментів в ній.

У результаті виконаного розрахунку був визначений час втрати несучої здатності – 95 хв. Цей час був визначений з огляду на отриманий діючий у цій балці момент. Відповідно до технічних умов $M = 267,5 \text{ кНм}$ (приблизно 0,3 від руйнівального навантаження).

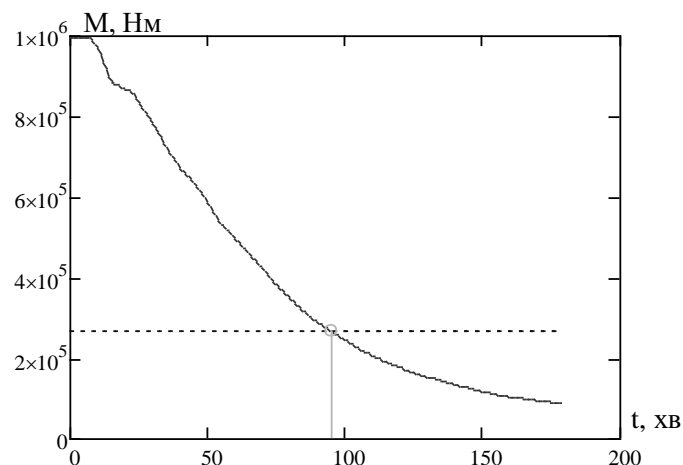


Рисунок – 5.7. Графік зниження несучої здатності залізобетонної балки

Застосування удосконаленого методу розрахунку на вогнестійкість дозволяє ефективно прогнозувати роботу залізобетонної балки прямокутного перерізу в умовах пожежі.

5.3. Застосування удосконаленого методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонного ригеля із ступінчастим перерізом в екстремальних умовах високих температур

Використовуючи дані інтерполяції результатів вимірювання під час високотемпературних випробувань залізобетонного ригеля, наведених на рис. 4.10, була розв'язана задача міцності за розробленим алгоритмом.

Переріз ригеля був розбитий на прямокутні зони розміром 10×10 мм.

Граничний максимальний прогин ригеля становить:

$$D = \frac{L^2}{400 \cdot b} = \frac{2,56^2}{400 \cdot 0,95} = 0,036 \text{ м.}$$

Гранична кривизна ригеля становить:

$$\chi = 24 \cdot 10^{-3} 0,95^{-1} = 0,0053 \text{ м}^{-1}$$

У кожний контрольний момент часу, за формулою (5.6) були побудовані графіки залежності внутрішнього моменту від кривизни ригеля і визначені їхні максимальні значення. На рис. 5.8 побудовані вказані графіки для деяких моментів часу випробування.

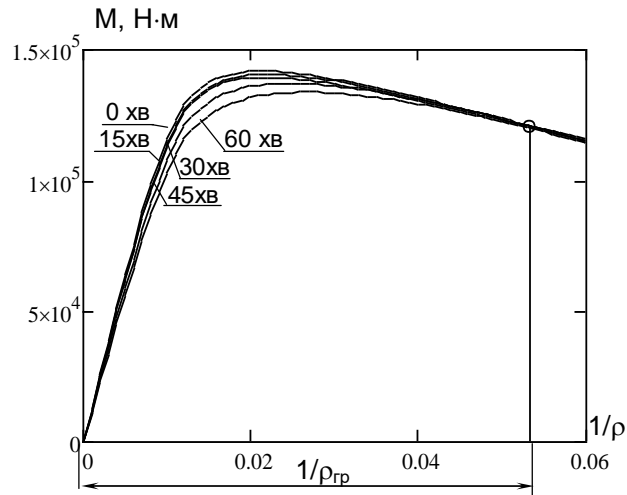


Рисунок – 5.8. Графіки моменту за граничного значення кривизни для заданих моментів часу випробування залізобетонного ригеля №1 за даними, що отримані за методикою інтерполяції

У результаті виконаного розрахунку були визначені залежності зниження несучої здатності від часу випробувань для двох досліджуваних ригелів із використанням запропонованого методу інтерполяції. Отримані залежності наведені на рис. 5.9.

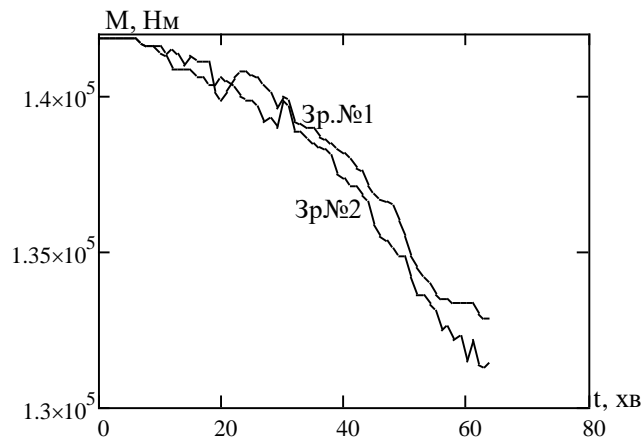


Рисунок – 5.9. Графік зниження несучої здатності залізобетонного ригеля за результатами, які отримали за умови застосування запропонованого методу інтерполяції

Виконані розрахунки показали, що час настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності у всіх випадках не досягається. Час настання граничного стану був визнаний з огляду на обраний діючий момент у цьому ригелі, згідно із технічними умовами (приблизно 0,3 від руйнівного навантаження) $M = 50$ кНм.

5.4. Перевірка адекватності результатів розрахунку вогнестійкості залізобетонних ригелів із прямокутним перерізом за запропонованим методом

Для оцінювання адекватності результатів прогнозування роботи залізобетонних балок, що отримані за методикою інтерпретації цих температурних вимірювань у результаті високотемпературних випробувань без прикладання механічного навантаження, використано дані експерименту з прикладанням механічного навантаження, які наведені у навчально-науковій та науковій літературі [84,68, 109].

Для проведення аналізу обрано результати високотемпературних випробувань залізобетонних балок, технічні параметри яких подані у табл. 5.2. На рис. 5.10 наведені схеми перерізів досліджуваних балок.

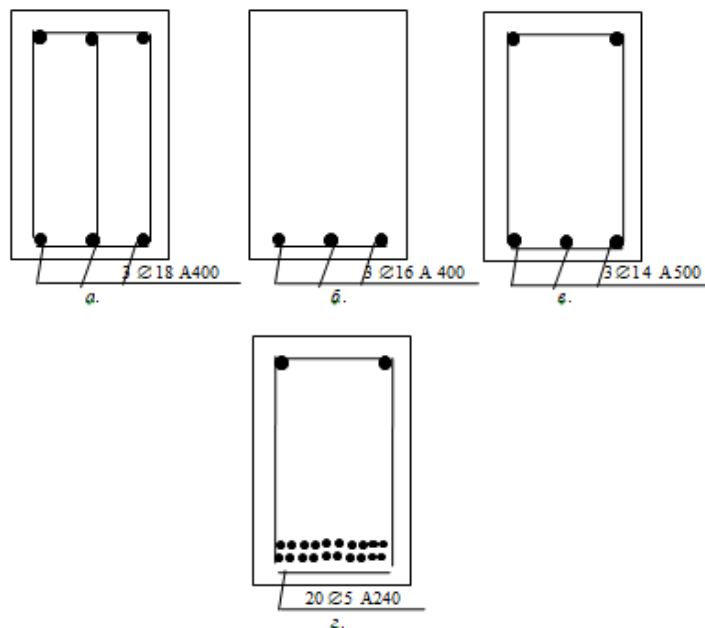


Рисунок – 5.10. Схеми перерізів залізобетонних балок

Таблиця 5.2. Параметри залізобетонних балок для перевірки адекватності результатів застосування удосконаленого методу розрахунку на вогнестійкість

Позначення балок	Зображення на рис. 5.10	Довжина, м	Переріз		Бетон		Арматура		Момент у перерізі, кНм	Критичний прогин, см	Критична швидкість нарощення прогину, мм/хв	Час настання гр. стану, хв	Час досягнення, хв		Літературне джерело
			Висота, м	Ширина, м	Межа міцності, МПа	Тип	Клас міцності	Діаметр стержня, м					критичного прогину	критичної швидкості	
БМ1	<i>a</i>	3,2	0,35	0,2	20	важ.	A-III	0,018	364	8,8	3,9	115	-	60	[84, 68]
БМ2	<i>б</i>		0,35	0,15	27	важ.	A-IV	0,016	532			55		51	
БМ3	<i>в</i>	0,35	0,15	35	важ.	A-IV	0,014	515	50						
БМ4	<i>г</i>	0,35	0,15	32	важ.	A-IV	0,014	823	52						
БМ5	<i>д</i>	0,35	0,15	28	важ.	Bp-II	0,005	796	42						

Температурні дані були отримані за показниками термопар, схема розташування яких подана на рис. 5.11.

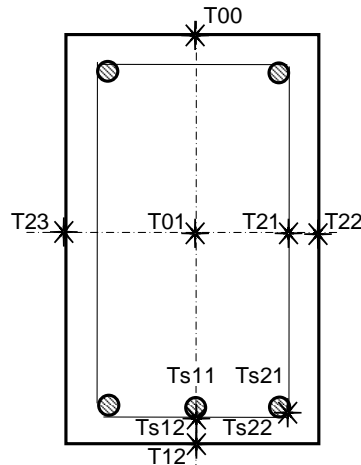


Рисунок – 5.11. Схема розташування термопар у перерізі балок

Дійсність отриманих результатів інтерполяції оцінювали за допомогою критерію Фішера, який визначають за формулою (4.2).

Дисперсію адекватності визначено за формулою:

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^5 (U_i^{met} - \bar{U}_i^{test})^2}{5} \quad (5.7)$$

де U_i^{met} та U_i^{test} – відповідно значення часу настання граничного стану балок у хвиликах, отримані за досліджуванням та у результаті проведення випробувань за даними робіт [20, 88].

Дисперсію відтворюваності визначено за формулою:

$$S_{від}^2 = \frac{\sum_{i=1}^5 (\bar{U}_i^{test} - U_i^{test})^2}{5} \quad (5.8)$$

Критичне значення F-критерію обрано відповідно до ДСТУ ISO 2854:2008 [75].

Результати аналізу наведені у табл. 5.3.

Таблиця 5.3. Параметри залізобетонних балок для перевірки адекватності результатів інтерполяції

Найбільше відхилення, хв	Найбільше середнє відносне відхилення, %	Дисперсія відтворюваності $S_{від}^2 =$	Дисперсія адекватності, $S_{ад}^2$	Розрахункове значення F-критерію
6	10,9	8,7	8,97	0,97

Дані табл. 5.3 вказують на те, що їхня похибка складає 10,9 %, що підтверджує результативність удосконаленого методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів. Критерій Фішера не перевищує табличного значення, що становить 1,01.

5.5. Висновки до розділу

Встановлені результати досліджень дозволяють викласти такі висновки:

1. Обґрунтовано метод розв'язування міцнісної задачі за умови застосування запропонованого методу високотемпературних випробувань залізобетонних ригелів на основі деформаційної моделі зважаючи на фізичні та геометричні не лінійності.

2. Показано, що отримані результати за допомогою запропонованого методу випробувань, є достатньо точними, оскільки розбіжність з теоретичними та експериментальними даними у середньому становлять 10,9 %.

3. Обґрунтовано застосування удосконаленого методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних ригелів та балок як із прямокутним, так і із ступінчастим перерізом в умовах пожежі.

4. Застосування удосконаленого методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів дозволяє точніше визначити клас вогнестійкості будівельної конструкції на основі визначення фактичної межі вогнестійкості.

ВИСНОВКИ

У науковій праці вирішено актуальне науково-технічне завдання щодо визначення зміни розподілень температури та міцності бетону у перерізах залізобетонних ригелів та балок залежно від тривалості теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі, як наукового підґрунтя удосконаленого методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів. З огляду на це одержано такі основні результати.

1. У результаті аналізу літературних джерел та нормативної бази щодо сучасного стану методів оцінювання вогнестійкості залізобетонних балок та ригелів встановлено, що нормована вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів може бути забезпечена шляхом її оцінювання, якщо застосовувати удосконалений метод розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів на основі використання уточнених механічних характеристик бетону в умовах його нагрівання під впливом стандартного температурного режиму пожежі як частини початкових даних для його реалізації.

2. Розроблено метод ідентифікації залежності коефіцієнта зниження міцності бетону, заснований на інтерполяції температурних розподілень у перерізах залізобетонних балок та ригелів під час їхніх вогневих випробувань за точковими температурними вимірюваннями у шарах бетону та деформаційній математичній моделі напружено-деформованого стану ригелів та балок в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі. Порівняльний аналіз отриманих результатів ідентифікації коефіцієнта зниження міцності бетону за показниками, отриманими з використанням даних розрахунків скінченно-елементного аналізу показав їхню гарну збіжність, оскільки відносна похибка становить 6,4 %.

3. Розроблено методику експериментального дослідження залізобетонних ригелів в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі, що містить спосіб вимірювання

температури та вимірювання максимального прогину, і проведено відповідні випробування.

4. Виявлено закономірності зміни геометричних характеристик конфігурації та розташування ізотерм у перерізі залізобетонних ригелів під час їхніх стандартних випробувань за умов високих температур, які є параболічними функціями із показником ступеня, що залежить від часу проведення цих випробувань.

5. За розробленим методом ідентифікації залежності коефіцієнта зниження міцності бетону отримано уточнену залежність коефіцієнта зниження міцності бетону для залізобетонних ригелів за результатами вогневого випробування, що дозволить підвищити точність методу розрахунку на вогнестійкість для елементів конструкцій цього типу на 8 %.

6. Виявлено закономірність температурної залежності коефіцієнта зниження міцності бетону для залізобетонних балок та ригелів в умовах вогневих випробувань з використанням запропонованого методу її ідентифікації, що може бути описана регресійною залежністю:

$$k_c(\theta) = 1 + 1.505 \cdot 10^{-3} \theta - 7.123 \cdot 10^{-6} \theta^2 + 6.655 \cdot 10^{-9} \theta^3 - 1.921 \cdot 10^{12} \theta^4.$$

7. Удосконалено метод розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів в умовах стандартного температурного режиму пожежі у результаті використання отриманої температурної залежності коефіцієнта зниження міцності бетону як частини початкових даних для визначення часу настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності на основі розв'язку задачі міцності за деформаційною математичною моделлю.

8. Адекватність результатів розрахунку на вогнестійкість залізобетонних ригелів та балок за запропонованим удосконаленим методом розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів підтверджено за критерієм Фішера. Цей критерій не перевищив табличного значення. За результатами адекватності похибка інтерполяції у порівнянні із експериментальними та теоретичними даними становить 10,9 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Звіт про основні результати діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2019 році. <https://dsns.gov.ua/upload/1/1/6/7/4/3/2020-1-30-publicnii-zvit-za-2019-rik-ost-fin.pdf>
2. Звіт про основні результати діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2020 році. <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/17-civik-2018/zvit2020/zvit-2020-dsns.pdf>
3. Звіт про основні результати діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2021 році. <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/17-civik-2018/zvit2021/zvit2021-dns.pdf>
4. Звіт про основні результати діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2022 році. <https://dsns.gov.ua/upload/1/6/4/9/3/5/0/publicnii-zvit-2022-ostannia-versiia-1.pdf>
5. World Fire Statistics 2011-2021. <https://www.ctif.org/world-fire-statistics>
6. Осипенко В. І., Поздєєв С. В., Тищенко І. Ю. Будівельні матеріали та їх поведінка при дії високих температур : навч. посіб. Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля. 2011. 202 с.
7. ДБН В.1.2-9:2021 Основні вимоги до будівель і споруд. Безпека і доступність під час експлуатації: ДСТУ (Держ. Стандарт України). Наказ від 30.12.2021 р. № 366. 22 с.
8. Eurocodes: background & applications. Structural Fire Design. Worked examples. / O. Vassart et al. Luxemburg : Publication Office of the European Union, 2014. 252 p.
9. Sundstrom B. Test Methods and Their use for Fire Safety Engineering. *Materiały V Międzynarodowy Konferencji “Bezpieczeństwo pożarowe budowli*. 2005. P. 141–150.

10. Стійкість будівель і споруд при пожежі / Тищенко О. М. та ін. Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2019. 332 с
11. W. Lu., P. Makelainen. *Advanced Steel Structures. Structural Fire Design. Helsinki University of Technology Laboratory of Steel Structures Publications*. 2003. Vol. 29, Espoo.
12. ISO 834-75 Fire resistance test. Elements of building constructions : European Committee for Standardization. 2000.
13. Roytman V. M., Pasman H. J., Lukashevich I. E. The Concept of Evaluation of Building Resistance against combined hazardous Effects “Impact–Explosion–Fire” after Aircraft Crash. *Fire and Explosion Hazards. Proceedings of the Fourth International Seminar*. 2003. P. 283–293.
14. Поздєєв А. В. Врахування впливу модифікаторів бетону залізобетонних балок при розрахунковому визначенні їх вогнестійкості : дис. кандидата технічних наук. Київ, 2012. 157 с.
15. ДСТУ 2272:2006. Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять : ДСТУ (Держ. Стандарт України). Наказ № 162 від 09.06.2006 р. 28с.
16. Першаков В. М., Лисницька К. М. Урахування ризиків виникнення аварії при проектуванні будівель та споруд. *Науково-технічний збірник Національного авіаційного університету «Проблеми розвитку міського середовища»*. 2014. Т. 2, № 12. С. 335–344.
17. Барабаш М. С., Усольцев І. О. Особливості моделювання висотних будівель з урахуванням впливу динамічних навантажень. *Науково-виробничий журнал «Будівництво України»*. 2012. № 1. С. 24–28.
18. С. М. Стовпник, А. Л. Ган, Л. В. Шайдецька. Реконструкція підземних споруд. Розрахунок і конструювання підсилення несучих елементів будівлі: навч. посіб. Київ. КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 63 с.
19. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення: ДСТУ (Держ. Стандарт України) Наказ № 38 від 27.02.2019 р. 84 с.

20. Кропива М. О. Удосконалення розрахункового методу оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками: дис. кандидата технічних наук. Черкаси, 2016. 146 с.

21. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги: ДБН (Держ. Буд. Норми) Наказ від 31.10.2016 № 287. 35 с.

22. ДСТУ Б В.3.1-2:2016 Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій та основ будівель і споруд: ДСТУ (Держ. Стандарт України) Наказ від 24.06.2016 № 182. 65с.

23. ДБН В.1.2-14:2018 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Зі Зміною № 1: ДБН (Держ. Буд. Норми) Наказ від 02.08.2018 № 198. 30 с.

24. ДБН В.2.2-16:2019 Культурно-видовищні та дозвіллеві заклади: ДБН (Держ. Буд. Норми) Наказ від 26.03.2019 № 85. 93 с.

25. ДБН В.2.2-3:2018 Будинки і споруди. Заклади освіти. Зі Зміною № 1: ДБН (Держ. Буд. Норми) Наказ від 25.04.2018 № 106. 57 с.

26. ДБН В.2.2-9:2018 Громадські будинки та споруди. Основні положення. Зі Зміною № : ДБН (Держ. Буд. Норми) Наказ від 28.09.2018 р. № 260. 43 с.

27. ISO 834-1:1999 Fire resistance tests – Element of building construction - Part 1: General requirements.

28. Будівлі та споруди та їх поведінка в умовах пожежі: навч. посіб. / Андрієнко В.М та ін. Київ : ІДУЦЗ, 2014. 295 с.

29. Bednarek Z., Ogrodnik P. Deflection prediction of reinforced concrete beams by design codes and computer simulation. *Engineering Structures*. 2013. Volume 56. P. 2175–2186.

30. Розрахунок залізобетонних конструкцій на вогнестійкість відповідно до Єврокоду 2: практ. посіб. / В.Г.Поклонський та ін. Київ : ДП НДІБК Мінрегіону України, 2016. 83 с.

31. Ткачук І.А. Несна здатність залізобетонних згинаних конструкцій при силових, деформаційних та високотемпературних впливах. С. 345–353 <http://dorogimosti.org.ua/files/upload/49.pdf>

32. Analysis and prediction methods for the static properties of reinforced concrete beams under fire / Chaofeng Liu et al. *Structures*. 2023. Volume 47. P. 2319–2330. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.041>

33. Reinforced Concrete Beams, Columns and Frames : підручник / Charles Casandjian et al. John Wiley & Sons, Inc., 2013. 294 p. <https://doi.org/10.1002/9781118639511.biblio>

34. Comparative fire behavior of reinforced concrete beams made of different concrete strengths / Kodur et al. *11th International Conference on Structures in Fire. The University of Queensland* 2020. <https://doi.org/10.14264/bd10594>

35. Experimental assessment of concrete compressive strength in old existing RC buildings: A possible way to reduce the dispersion of DT results / Enrico Quagliarini et al. *Journal of Building Engineering*. 2016. Volume 8. P. 162-171. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.10.008>

36. R. P. Johnson, Y. C. Wang. *Composite Structures of Steel and Concrete: Beams, Slabs, Columns and Frames for Buildings*. 2019. 265 p.

37. Calculation of fire resistance of building structures in software packages / Ivan Dmitriev et al. *E3S Web of Conferences. Topical Problems of Architecture, Civil Engineering and Environmental Economics*. 2019. Vol. 91. 02007 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199102007>

38. Войцехівський О.В, Журавський О.Д, Байда Д.М. Розрахунок залізобетонних конструкцій з використанням спрощених діаграм деформування матеріалів (за ДСТУ Б.В. 2.6-156:2010). Частина 1.

Розрахунок за першою групою граничних станів. Київ : КНУБА, 2017. 168 с.

39. А.С. Пушкаренко, О.В. Васильченко. Будівельні матеріали та їх поведінка в умовах високих температур. Харків: АПБУ, 2001. 166 с.

40. Gerhardt H. Design Method of Smoke and Heat exhaust Systems in construction Works. *Materiały V Międzynarodowy Konferencji Bezpieczeństwo pożarowe budowli*. 2005. P. 127–140.

41. Kowalski R., Górska B. Badanie zmian strukturalnych betonu narażonego na działanie wysokich temperatur. *Materiały V Międzynarodowy Konferencji. Bezpieczeństwo pożarowe budowli*. 2005. P. 315–322.

42. ДСТУ Б В.1.1-4-98* Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Зі Зміною № 1: ДСТУ (Держ. Стандарт України) Наказ від 28.10.1998 № 247. 20 с.

43. ДСТУ Б В.1.1-13:2007 Захист від пожежі. Балки. Метод випробування на вогнестійкість (EN 1365-3:1999, NEQ) : ДСТУ (Держ. Стандарт України) Наказ від 22.06.2007 № 64. 6 с.

44. ДСТУ 2857-94 Перетворювачі термоелектричні. Загальні технічні умови : ДСТУ (Держ. Стандарт України). Наказ від 23.11.1994 № 290. 14 с.

45. EN 13501-1:2002 “Fire classification of construction products and building elements” – Part 1.2. : European Committee for Standardization. 2002.

46. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1992-1-2:2004, ІДТ) : ДСТУ (Держ. Стандарт України). Наказ від 21.12.2012 № 652 Про прийняття національних стандартів, ідентичних до європейських нормативних документів на проектування будівельних конструкцій.

47. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1992-1-2:2004, ІДТ) : ДСТУ (Держ. Стандарт України). Наказ від 21.12.2012 № 652 Про прийняття національних

стандартів, ідентичних до європейських нормативних документів на проектування будівельних конструкцій.

48. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі. Зміна № 1 (EN 1991-1-2:2002, IDT+EN 1991-1-2:2002/AC:2013, IDT+NA:2013): ДСТУ (Державний Стандарт України). Наказ від 27.12.2013 р. № 616 Про прийняття Зміни № 1 ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010.

49. EN 1365-3: 1999 Fire resistance tests for loadbearing elements – Part 3 Beams.

50. ДСТУ Б В.1.1-18:2007 Захист від пожежі. Споруди та фрагменти будівель. Метод натурних вогневих випробувань. Загальні вимоги. ДСТУ (Державний Стандарт України).

51. Gedam B. A. Fire resistance design method for reinforced concrete beams to evaluate fire-resistance rating. *Structures*. Vol. 33. 2021. P. 855–877. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.046>

52. Круковський П. Г. Зворотні завдання тепломасоперенесення (Загальний інженерний підхід). Київ : НАНУ Ін-т техн. теплофізики, 1998. 224 с.

53. Поздєєв С.В. Дослідження ефективності математичних моделей напружено-деформованого стану при визначенні вогнестійкості залізобетонних плит. *Збірник наукових праць Академії пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля «Пожежна безпека: теорія і практика»*. 2010. №. 6. С. 125–133.

54. Поздєєв С. В. Дослідження адекватності результатів математичного моделювання тепломасообміну у вогневій печі при випробуваннях залізобетонної плити на вогнестійкість. *Збірник наукових праць Академії пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля «Пожежна безпека: теорія і практика»*. 2010. Випуск № 6/1. С. 60 – 65.

55. Шналь Т. М. Розвиток наукових основ розрахункової оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій за умов впливу параметричних температурних режимів пожеж : дис. доктора техних наук. Львів. 2019. С.

56. ISO 834-11:2014. Fire resistance tests – Elements of Building Construction.

57. Бабич Є.М., Бабич В.Є. Розрахунок і конструювання залізобетонних балок: навч. посібник. 2-ге видання перероблене і доповнене. Рівне. НУВГП. 2017. 191 с.

58. П.Г Круковський, С.В Новак Аналіз існуючих методів оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій. *Збірник наукових праць Академії пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля «Пожежна безпека: теорія і практика»*. 2013. № 4. С. 69 – 72.

59. Перспективи підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій / Беліков А.С. та ін. *Матеріали конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. м. Черкаси. ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2017. С.171-173.

60. Демчина Б.Г. Сучасні тенденції у дослідженнях вогнестійкості 135 будівельних конструкцій. *Збірник наукових праць Львівського державного університету безпеки життєдіяльності «Пожежна безпека»*. 2001. С 383-385.

61. EN 1364-3. Випробування на вогнестійкість елементів, що несуть навантаження. Частина 4. Стіни.

62. EN 1364-4. Випробування на вогнестійкість елементів, що несуть навантаження. Частина 4. Колони.

63. Практичний посібник із розрахунку залізобетонних конструкцій за діючими нормами України (ДБН В.2.6-98:2009) та новими моделями деформування, що розроблені на їхню заміну / Бамбура А.М. та ін. Київ. ТОВ Талком. 2017. 626 с.

64. The improvement of the method to determine the temperature in steel reinforced concrete slabs in assessment of their fire resistance / Sidnei S. et al. *Materials Science Forum*. 2022. Vol. 1066.

65. Дослідження адекватності математичної моделі тепломасообміну випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій / С. В. Поздєєв та ін. *Збірник наукових праць Української державної академії*. Харків: УДАЗТ, 2013. № 142. С. 220 – 227.

66. Словінський В. К. Обґрунтування методу розв'язку міцнісної задачі при розрахунковій інтерпретації результатів вогневих випробувань залізобетонних колон. *Збірник наукових праць Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки «Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека»*. 2013. № 2 (32). С.5 – 11.

67. Поздєєв С. В. Дослідження ефективності вогнезахисної обробки залізобетонних балок покриттями, що спучуються. *Журнал Житомирського державного технологічного університету «Вісник ЖДТУ»*. 2010. №3 (54). С.12 – 16.

68. Поздєєв С. В. Розвиток наукових основ визначення меж вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій: дис. доктора технічних наук. НУЦЗ України. 2012. 385 с.

69. Оцінка вогнестійкості залізобетонного ригеля за допомогою експериментально-розрахункового метода / О. В. Некора та ін. *Науковий журнал УкрНДІПБ «Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека»*. 2016. № 2. С. 60-66.

70. Пушкаренко А. С., Васильченко О. В. Будівельні матеріали та їх поведінка в умовах високих температур: навч. посібник. Харків. АПБУ. 2001. 166 с.

71. Поздєєв С. В., Левченко А. Д. Розробка уточненого розрахункового методу для визначення межі вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій. *Науковий вісник Національного технічного університету «Львівська політехніка»*. Львів. 2011. С. 264 – 269.

72. Поздєєв С. В., Словінський В. К., Щіпець С. Д. Експериментально-розрахунковий метод оцінки вогнестійкості залізобетонних колон на основі їх вогневих випробувань *Збірник наукових праць Академії пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля «Пожежна безпека: теорія і практика»*. 2013. № 14. С. 88 – 93.

73. Визначення температурних полів у перерізі залізобетонної колони при її випробуванні на вогнестійкість / С. В. Поздєєв та ін. *Збірник наукових праць Академії пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля «Пожежна безпека: теорія і практика»*. 2013. № 15. С. 130 – 137.

74. Поздєєв С. В., Тищенко О. М. Дослідження ефективності математичних моделей теплопередачі для розв'язку теплотехнічної задачі при визначенні вогнестійкості залізобетонних конструкцій. *Збірник наукових праць Академії пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля «Пожежна безпека: теорія і практика»*. Випуск № 5. 2010. С. 122-129.

75. ДСТУ ISO 2854:2008 Статистичне опрацювання даних. Методи оцінювання та перевірки гіпотез про середні значення і дисперсії (ISO 2854:1976, IDT): ДСТУ (Держ. Стандарт України). Чинний з 01.01.2010 р. Наказ від 15.08.2008 № 289.

76. Поздєєв С. В., Григорян Б. Б., Поздєєв А. В. Удосконалення експериментально-розрахункової методики визначення залишкової несучої здатності залізобетонних колон після пожежі. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба «Системи обробки інформації»*. 2005. Випуск 7(47). С. 133 – 143.

77. Поздєєв С. В., Некора О. В., Поздєєв А. В. Обґрунтування вибору режимів нагріву зразків для експериментально-розрахункового методу визначення вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій. *Збірник наукових праць Львівського державного університету безпеки життєдіяльності «Пожежна безпека»*. 2006. № 9. С. 125–132.

78. Development of a Mathematical Model of Fire Spreading in a Three-Storey Building Under Full-Scale Fire-Response Tests / Shnal T. et as. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021.100 LNCE. p. 419–428.

79. Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces configurations / Nuianzin O. et as. *MATEC Web of Conferences*. Vol. 116. 02027.

80. Пожежна безпека будівель і споруд: навч. посібник / Кулешов М. М. та ін. Харків. 2004. 271 с.

81. Оцінка вогнестійкості ненесучих стін за розрахунковими методами Єврокоду / С. В. Поздєєв та ін. *Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка «Галузеве машинобудування, будівництво»*. 2015. Вип. 3. С. 277-283.

82. Determination of features of composite steel and concrete slab behavior under fire condition / Valeriia Nekora et as. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologiethis*. 2021. 6/7 (114).

83. Мацевитий Ю.М. До вирішення нестационарних обернених задач теплопровідності для багатошарових тіл. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Фізико-технічні проблеми енергетики та шляхи їх вирішення 2019»*. Харків. С. 8-9.

84. Будівельні конструкції та їх поведінки в умовах надзвичайних ситуацій: навч. посібник / О. В. Васильченко та ін. Харків: ХНАДУ 2015. 488 с.

85. Поздєєв С. В. Математичне моделювання напружено-деформованого стану залізобетонної балки під час пожежі. *Збірник наукових праць НУДЗУ «Проблеми пожежної безпеки»*. 2010. Вип. 27. С. 163-174.

86. Забезпечення інженерного захисту територій, будівель і споруд в умовах надзвичайних ситуацій: практикум / О.В. Васильченко та ін. Харків. НУЦЗУ. 2019. 218 с.

87. Хоменко О.Г. Залізобетонні конструкції: навчальний електронний посібник. Глухів. 2017. 208 с.

88. С. Л. Фомін, С. В. Бутенко, В. Г. Поклонський. Бетонні та залізобетонні конструкції, що призначені для роботи за умов впливу підвищених і високих температур. *Наук.-техн., виробн. та інформ.-аналіт. журнал ДП Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій «Наука та будівництво»*. 2016. № 4. - С. 24-31.

89. Міцнісні та деформаційні властивості бетону за підвищених температур сталезалізобетонних конструкцій / Фомін С.Л. та ін. *Збірник наукових праць Національного університету «Львівська політехніка»*. 2009.

90. Фомін С. Л. Вогнестійкість та залишкова міцність залізобетонних конструкцій. *Матеріали першої всеукраїнської науково-технічної конференції «Науково-практичні проблеми сучасного залізобетону»*. Київ: 1996. С. 183-185.

91. Фомін С. Л. Діаграма стану арматури для розрахунку залізобетонних конструкцій при нормальних та високих температурах. *Міжвідомчий науково-технічний збірник Державного НДІ Будівельних Конструкцій «Будівельні конструкції»*. 2005. Т. 1. С. 372-379.

92. Фомін С. Л. Вогнестійкість багатоповерхових каркасних будівель. *Міжвідомчий науково-технічний збірник Державного НДІ Будівельних Конструкцій «Будівельні конструкції»*. 2005. Т. 2. С. 310-315.

93. Complete “stress-strain” diagrams of rolled steel beams / Stanislav Fomin et as. *MATEC Web of Conferences. EDP Sciences*. 2018. 203. P. 02008.

94. Перельмутер О. В., Перельмутер А.В., Слівкер В.І. Розрахункові моделі споруд та можливість їхнього аналізу: посібник. Київ. Видавництво "Сталь". 2002. 600 с.

95. ДСТУ EN 13501-1:2016 Пожежна класифікація будівельних виробів і будівельних конструкцій. Частина 1. Класифікація за результатами випробувань щодо реакції на вогонь (EN 13501-

1:2007+A1:2009, IDT). ДСТУ (Державний Стандарт України). Наказ від 11.08.2016 № 236. 73 с.

96. Methods of mathematical modeling of the area of carbonation of wooden beams with lining of fire protective plywood. Pozdieiev S. et as. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. 2020. Том 4. № 2. С. 97 – 105. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524-2636.2020.4.2.-97-105>

97. Шналь Т.М., Синенько І. П., Ясінський Д. А. Аналіз методів проведення натурних випробувань на вогнестійкість будівель та споруд. *Збірник наукових праць Національного університету «Львівська політехніка» Вісник НУ Львівська політехніка*: 2010. № 664. С. 357–362.

98. Дослідження адекватності математичної моделі тепломасообміну випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій / О. М. Нуянзін та ін. *Збірник наукових праць Академії пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля «Пожежна безпека: теорія і практика»*. 2013. № 13. С. 91–100.

99. Удосконалення нормативної бази на методи випробування будівельних конструкцій на вогнестійкість / Новак С. та ін. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Пожежна безпека - 2007»*. Черкаси. 2007. с. 273–275.

100. Research of Wooden Bearing Structures Behavior Under Fire Condition with Use Advanced Methods of Fire Resistance Calculation Considering Eurocode 5 / Pozdieiev S. et as. *Recommendation, International Scientific Conference on Woods & Fire Safety*. Wood & Fire Safety. 2020: p. 326-332.

101. Інтерпретація результатів вогневих випробувань залізобетонних балок для оцінки їхньої межі вогнестійкості / Отрош Ю.А. та ін. *Науково-виробничий журнал ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій ім.*

В.М. Шимановського: Промислове будівництво та інженерні споруди. 2014 № 2.

102. Pozdieiev S., Nekora O., Slovynsky V. The research of bearing capacity of reinforced concrete beam with use combined experimental-computational method. *MATEC Web of Conferences*. 2017. 116. 02024.

103. Research of the behavioral of the wooden beams with fire protection lining under fire loading / Zmaha M.I. et as. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. 1021(1). 012031.

104. Kodur, V. K. R. Guidelines for Fire Resistance Design of High-Strength Concrete Columns. *J. of Fire Protection Engineering* 15:2.2005. p. 93-106.

105. Gurung S., Salem O. Effects of Load Level on the Structural Fire Behaviour of GFRP-Reinforced Concrete Beams with Straight-End bar Lap Splices. 2023. *Lecture Notes in Civil Engineering* 267. P. 85-92.

106. Проектування залізобетонних конструкцій: посібник / Бамбура А. М. та ін. Київ. Майстер книг. 2018. 239 с

107. Improvement of the Assessment Method for Fire Resistance of Steel Structures in the Temperature Regime of Fire under Realistic Conditions / T. Shnal et as. *Materials Science Forum*. 2020. 1006. P. 107 – 116.

108. Eurocodes: Background & Applications Structural Fire Design. JRC Science and Policy Report / O. Vassart et as. *Publications Office of the European Union*. 2014.

109. Методика оцінювання адекватності результатів визначення меж вогнестійкості залізобетонних балок експериментально-розрахунковим методом / Поздєєв В.С. та ін. *Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка «Галузеве машинобудування, будівництво»*. 2014. Вип. 1(40). С. 129-136.

110. ДСТУ Б В.2.7-214:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. ДСТУ (Державний Стандарт України). Наказ від 22.12.2009 № 633. 43 с.

111. ДСТУ Б В.2.7-306:2015 Суміші бітумомінеральні дорожні. Методи випробувань. ДСТУ (Державний Стандарт України). Наказ від 30.12.2015 № 343.

112. ДСТУ Б В.2.7-319:2016 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Методи випробувань. ДСТУ (Державний Стандарт України). Наказ від 01.07.2016 № 196.

113. Клованич С. Ф., Мироненко І. Н. Метод кінцевих елементів у механіці залізобетону: монографія. Одеса: ОНМУ. 2007. 110 с.

114. С.М. Гребенюк, С.І. Гоменюк. Чисельні методи розв'язання механічних задач: навчальний посібник. Запоріжжя: Запорізький національний університет. 2022. 80 с.

115. ANSYS, ANSYS 9.0 Manual Set ANSYS Inc. Southpoint. 275 Technology Drive. Canonsburg. PA 15317. USA.

116. Ivan Dmitriev, Vladimir Lyulikov, Olga Bazhenova. Calculation of fire resistance of building structures in software packages. *Web of Conferences*. 2019 E3S. 91(1):02007.

117. Kovalyshyn V., Pozdieiev S., Fedchenko S. Concrete walls conduct under the fireinfluence investigation using final elements method. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Т. 4 (2018). С. 89–98. URI: <https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/issue/view/4>

118. Бамбура А.М. Розвиток методів оцінки напружено-деформованого стану та несучої здатності залізобетонних конструкцій на основі реальних діаграм деформування матеріалів. *Матеріали першої всеукраїнської науково-технічної конференції «Науково-практичні проблеми сучасного залізобетону»*. Київ. 1996. С. 36 - 39.

119. Вогнестійкість залізобетонних балок в умовах впливу параметричних температурних режимів пожежі / Поздєєв С. В. та ін. *XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*

«Надзвичайні ситуації: безпека та захист». Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 28-29 жовтня 2021. С.179-180.
<https://chipb.dsns.gov.ua/upload/1/2/2/8/5/2/3/2021-10-26-nadzvicaini-situaciyi-zbirnik-tez-konferenciyi-2021.pdf>

120. Оцінка вогнестійкості залізобетонних балок на основі використання параметричних температурних кривих режимів пожежі / Поздєєв С. В. та ін. *IX Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті»*. Харків: УкрДУЗТ 17-18 листопада 2021. С. 160-161.
http://conf.kart.edu.ua/images/stories/konf-1/pdf/Theses_2021_10.12.pdf

121. Дослідження розподілу температури у сталі залізобетонних плитах при пожежі / Поздєєв С. В. та ін. *XIII Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 26 квітня 2022 С. 179-180.
<https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2022/6.pdf>

122. Дослідження залежності показників вогнестійкості сталевих елементів від рівня механічного навантаження / Федченко С. М. та ін. *Всеукраїнська науково-практична конференція курсантів, студентів, ад'юнктів (аспірантів) «Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених»*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 26 травня 2022. С.66-68.

123. Достовірність результатів вогневих випробувань при оцінюванні межі вогнестійкості несучих стін: монографія / Поздєєв С. В. та ін. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. С. 100.

124. Evaluation of fire resistance of reinforced concrete beams on the basis of use of parametric temperature curves of fire modes / Pozdieiev S. et as. *AIP conference proceedings «Reliability and durability of railway transport*

engineering structure and buildings». Kharkiv: Ukrainian state university of railway transport. AIP 2684. 030034 (31.05.2023).

DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0120002>

125. Method for identifying the strength characteristics of concrete of a reinforced concrete crossbar during heating under conditions of fire / Serhii Pozdieiev. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. №3 (7(123)). DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.282205>

126. Поздєєв С. В., Некора О. В., Федченко С. М. Оцінка вогнестійкості залізобетонного ригеля. *Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення»*. Львів: ЛДУБЖД, 12-13 жовтня 2022. С.135-138 URI:

<https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/11068>

127. Pozdieiev S., Fedchenko S., Kapalo P. Assessment of the fire resistance of reinforced concrete crossbar. *XII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»: тези доповідей*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 27 – 28 жовтня 2022. С. 77-78.

<https://chipb.dsns.gov.ua/upload/1/5/1/1/8/0/1/gTG4Mzjniuitb9Waoili99FDDQ UI4FF3CEp78K5A.pdf>

128. Федченко С. М., Поздєєв С. В. Уточнення коефіцієнта зниження міцності бетону залізобетонних ригелів за результатами вогневих випробувань. *Міжнародна науково - практична конференція молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту»* м. Харків: НУЦЗ України 20 – 21 квітня 2023. С.116.

<https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2023/20-21042023.pdf>

129. Федченко С. Обґрунтування методу ідентифікації механічних характеристик бетону залізобетонних ригелів за результатами вогневих випробувань. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної*

безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація». 2023. Т. 7. № 1. С. 149-157 DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.1.149.157>

130. Method of Identification of Mechanical Characteristics of Concrete of Reinforced Concrete Crossbars according to the Results of Fire Tests. Pozdieiev S. et as. *Construction Technologies and Architecture. Trans Tech Publications Ltd.* 2023. С. 9 P. 59 - 66. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-kev0Ho>

131. Удосконалення зонного методу перевірки вогнестійкості пустотної плити / Станіслав Сідней та ін. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація».* 2022. Т. 6. № 1. С. 95–103. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.1.95-102>

132. Дослідження вогнестійкості елементів сталевих каркасів промислових будівель з врахуванням рівня механічного навантаження / Віктор Гвоздь та ін. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація».* 2021. Т. 5. № 1. С. 40–49. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524-2636.2021.5.1.-40-49>

133. Федченко С.М. Дослідження зниження міцності бетону залізобетонного ригеля в умовах вогневих випробувань. *Науково-технічний збірник Харківського національного університету міського господарства імені О.М.Бекетова «Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура.* 2023. Т. 6. № 180. С 176-186. <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6208/6127>

ДОДАТОК А

**Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про
апробацію результатів дисертації**

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

Опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. С. М. Федченко Дослідження зниження міцності бетону залізобетонного ригеля в умовах вогневих випробувань. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. 2023. Т. 6. № 180. С. 176-186.

<https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6208/6127>

2. Федченко С. Обґрунтування методу ідентифікації механічних характеристик бетону залізобетонних ригелів за результатами вогневих випробувань. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: зб. наук. праць*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2023. Т. 7. № 1. С. 149-157. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.1.149.157>

3. Сідней С., Кобко В., Федченко С., Змага М., Заїка Н. Удосконалення зонного методу перевірки вогнестійкості пустотної плити. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: зб. наук. праць*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2022. Т. 6. № 1. С. 95–103. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.1.95-102>

4. Гвоздь В., Некора О., Сідней С., Неділько І., Федченко С., Тищенко Є. Дослідження вогнестійкості елементів сталевих каркасів промислових будівель з врахуванням рівня механічного навантаження. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: зб. наук. праць*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2021. Т. 5. № 1. С. 40–49. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524-2636.2021.5.1.-40-49>

5. Kovalyshyn V., Pozdieiev S., Fedchenko S. Concrete walls conduct under the fire influence investigation using final elements method. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: зб. наук. праць*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. Т. 4. 2018. С. 89–98. URI: <https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/issue/view/4>

6. Pozdieiev S., Nekora O., Fedchenko S., Shnal T. Method of Identification of Mechanical Characteristics of Concrete of Reinforced Concrete Crossbars according to the Results of Fire Tests *Construction Technologies and Architecture*. Trans Tech Publications Ltd. 2023. С. 9 P. 59 - 66. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-kev0Ho>

7. Pozdieiev S., Nekora O., Fedchenko S., Zaika N., Shnal T., Subota A., Nesukh M. Method for identifying the strength characteristics of concrete of a reinforced concrete crossbar during heating under conditions of fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. №3 (7(123)). 2023. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.282205>

8. Pozdieiev S., Shnal T., Kholod P., Fedchenko S., Nedilko I. Evaluation of fire resistance of reinforced concrete beams on the basis of use of parametric temperature curves of fire modes. *AIP conference proceedings «Reliability and durability of railway transport engineering structure and buildings»*. Kharkiv: Ukrainian state university of railway transport. AIP 2684. 030034 (31.05.2023). DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0120002>

9. 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. *Монографія*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2021. С. 100.

Апробація результатів дисертації:

10. Нуянзін О. М., Поздєєв С. В., Неділько І. А., Федченко С. М., Борсук О. В. Визначення стану втрати вогнестійкості сталевих балок з вогнезахисним мінераловатним облицюванням. *X Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*: тези доповідей (Черкаси, 29-30 жовтня 2020 р.). Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2020. С. 120-121.

<https://chipb.dsns.gov.ua/upload/1/2/2/8/5/2/9/2020-10-29-zbirnik-nsbz-2020.pdf>

11. Поздєєв С. В., Федченко С. М., Неділько І. А., Данкевич І., Канюк В. Вогнестійкість залізобетонних балок в умовах впливу параметричних температурних режимів пожежі. *XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*: тези доповідей (Черкаси, 28-29 жовтня 2021 р.). Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2021. С. 179-180.
<https://chipb.dsns.gov.ua/upload/1/2/2/8/5/2/3/2021-10-26-nadzvicaini-situaciyi-zbirnik-tez-konferenciyi-2021.pdf>

12. Поздєєв С. В., Шналь Т. М., Холод П. Ф., Федченко С. М., Неділько І. А. Оцінка вогнестійкості залізобетонних балок на основі використання параметричних температурних кривих режимів пожежі. *IX Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті»*: тези доповідей (Харків 17-18 листопада 2021 р.). Харків: УкрДУЗТ. 2021. С. 160-161.

http://conf.kart.edu.ua/images/stories/konf-1/pdf/Theses_2021_10.12.pdf

13. Поздєєв С. В., Федченко С. М., Неділько І. А., Заїка Н. П., Сідней А. С. Дослідження розподілу температури у сталі залізобетонних плитах при пожежі. *XIII Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*: тези доповідей (Черкаси, 26 квітня 2022 р.). Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2022 С. 179-180.

<https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2022/6.pdf>.

14. Федченко С. М., Некора В. С., Сідней А. С., Поздєєв С. В. Дослідження залежності показників вогнестійкості сталевих елементів від рівня механічного навантаження. *Всеукраїнська науково-практична конференція курсантів, студентів, ад'юнктів (аспірантів) «Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених»*: тези доповідей

(Черкаси, 26 травня 2022 р.). Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. С.66-68. https://chipb.net.ua/library/nauk_zbirnyk/

15. Поздєєв С. В., Некора О. В., Федченко С. М. Оцінка вогнестійкості залізобетонного ригеля. *Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення»: тези доповідей* (м. Львів, 12-13 жовтня 2022 р.). Львів: ЛДУБЖД. 2022. С.135-138 URI:

<https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/11068>

16. Pozdieiev S., Fedchenko S., Kapalo P. Assessment of the fire resistance of reinforced concrete crossbar. *XII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»: тези доповідей* (Черкаси, 27 – 28 жовтня 2022 р.). Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2022. С. 77-78.

<https://chipb.dsns.gov.ua/upload/1/5/1/1/8/0/1/gTG4Mzjniuitb9Waoili99FDDQUI4FF3CEp78K5A.pdf>

17. Федченко С. М., Поздєєв С. В. Уточнення коефіцієнта зниження міцності бетону залізобетонних ригелів за результатами вогневих випробувань. *Міжнародна науково - практична конференція молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту»: тези доповідей* (Харків, 20 – 21 квітня 2023 р.). Харків: НУЦЗ України. 2023 р.

С.116.https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2023/Problemy_ta_perspektyvy.pdf

18. Поздєєв С. В., Некора О. В., Федченко С. М., Шналь Т. М. Метод ідентифікації механічних характеристик бетону залізобетонних ригелів за результатами вогневих випробувань. *Міжнародної науково-практичної конференції «Problems of Emergency Situations»: тези доповідей* (Харків , 19 травня 2023 р.). Харків: НУЦЗ України. 2023 р. С. 110-111.

http://pesconf.nuczu.edu.ua/images/2022/Program_PES2023_130523_c.pdf

ДОДАТОК Б**Акти впровадження результатів дисертації**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший заступник начальника Інституту
державного управління та наукових
досліджень з цивільного захисту

« 21 » 20 23 року
Валерій БОРИС

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Федченко Світлани Миколаївни на тему «Удосконалення методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів»

Комісія у складі: голови комісії – головного наукового співробітника науково-дослідного центру протипожежного захисту доктора технічних наук Нікуліна Олександра Федоровича, членів комісії – начальника відділу дослідження, статистики пожеж та надзвичайних ситуацій кандидата технічних наук Климаса Руслана Володимировича, заступника начальника відділу нормативно-технічного забезпечення кандидата технічних наук, старшого дослідника Балло Ярослава В'ячеславовича склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи на тему «Удосконалення методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів» має теоретичне та практичне значення для доповнення до нормативно-правової бази, щодо визначення межі вогнестійкості залізобетонних балок та ригелів.

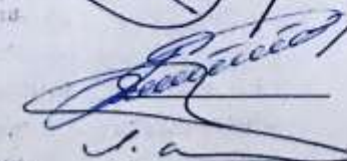
В дисертаційній роботі удосконалено метод розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних ригелів та балок на основі розробленого методу ідентифікації залежності коефіцієнту зниження міцності бетону від температури, який заснований на інтерполяції температурних розподілень у перерізах залізобетонних ригелів під час їхніх вогневих випробувань за точковими температурними вимірюваннями у шарах бетону та деформаційній математичній моделі напружено-деформованого стану ригелів в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Рекомендації удосконаленого методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів впроваджено у діяльність Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту під час виконання науково-дослідних робіт та розробки нормативно-правових актів.

Голова комісії:

 Олександр НІКУЛІН

Члени комісії:

 Руслан КЛИМАСЬ

 Ярослав БАЛЛО

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Черкаського інституту
пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету
цивільного захисту України
генерал-майор служби цивільного захисту



Віктор ГВОЗДЬ

2023 року

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи «Удосконалення методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів»

Розробник Федченко Світлана Миколаївна, з однієї сторони, та комісія у складі: голови комісії – начальника навчально-методичного відділу кандидата технічних наук, доцента Джулая Олександра Миколайовича та членів комісії – начальника кафедри безпеки об'єктів будівництва та охорони праці кандидата технічних наук, доцента Березовського Андрія Івановича, старшого викладача кафедри безпеки об'єктів будівництва та охорони праці Рудешко Ірини Вікторівни з іншої сторони, склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи за темою: «Удосконалення методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів» мають теоретичне та практичне значення для освітнього процесу.

У дисертаційній роботі визначено шляхи та запропоновано удосконалення методу розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних балок та ригелів в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі у результаті використання розробленого методу ідентифікації залежності коефіцієнта зниження міцності бетону, як частини початкових даних для визначення часу настання граничного стану втрати несучої здатності на основі вирішення задачі міцності за деформаційною математичною моделлю.

З метою підвищення ефективності підготовки фахівців для ДСНС України результати дисертаційної роботи впроваджено в освітній процес при підготовці фахівців освітнього рівня «бакалавр» на кафедрі безпеки об'єктів будівництва та охорони праці за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» під час вивчення дисципліни «Стійкість будівель та споруд при пожежі», в розрізі теми: «Вогнестійкість залізобетонних конструкцій». Також при підготовці фахівців освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 263 «Цивільна безпека» під час вивчення дисципліни «Стійкість будівель та споруд в умовах надзвичайних ситуацій» за темою: «Вогнестійкість залізобетонних конструкцій» (протокол кафедри БОБ та ОП № 32 від 29.08.2023р.).

Голова комісії

Члени комісії:

Розробник

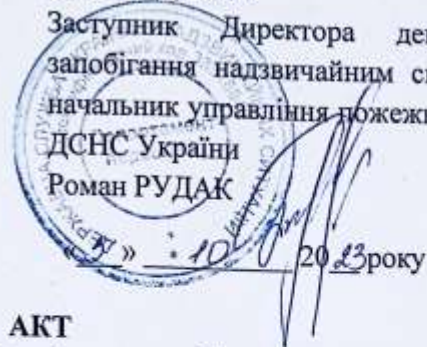
Олександр ДЖУЛАЙ

Андрій БЕРЕЗОВСЬКИЙ

Ірина РУДЕШКО

Світлана ФЕДЧЕНКО

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник Директора департаменту
запобігання надзвичайним ситуаціям –
начальник управління пожежної безпекиДСНС України
Роман РУДАК

АКТ

**впровадження результатів дисертаційної роботи
Федченко Світлани Миколаївни за темою: «Удосконалення методу
розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів»**

Комісія у складі: заступника начальника управління - начальника відділу нормативної та ліцензійної роботи управління пожежної безпеки Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям апарату ДСНС Кулика П.П., заступника начальника відділу нормативної та ліцензійної роботи управління пожежної безпеки Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям апарату ДСНС Кошеленка О.В. цим актом засвідчує, що результати дисертаційних досліджень Федченко С. М. впроваджено у діяльність Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям Державної служби України з надзвичайних ситуацій, шляхом апробації та практичного застосування удосконаленого методу розрахунку на вогнестійкість залізобетонних балок та ригелів.

Використовуючи отримані результати дисертаційної роботи Федченко С. М., обґрунтовано методику вогневих випробувань залізобетонних ригелів та балок при тепловій дії стандартного температурного режиму пожежі, а також удосконалений метод розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних ригелів. Для удосконалення методу оцінювання вогнестійкості застосовано, одержану у роботі температурну залежність коефіцієнта зниження міцності бетону як частину початкових даних, необхідних для розрахунку часу настання граничного стану втрати несучої здатності шляхом розв'язання задачі міцності залізобетонних ригелів та балок в умовах пожежі за деформаційною моделлю.

Використання запропонованої методики проведення вогневих випробувань та удосконаленої розрахункової методики дає змогу підвищити точність встановлених даних щодо відповідності залізобетонних ригелів та балок вимогам норм щодо їхньої вогнестійкості. Такий підхід дозволяє підвищувати пожежну безпеку об'єктів будівництва.

Голова комісії:

Павло КУЛИК

Член комісії:

Олег КОШЕЛЕНКО