

**ХАРКІВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**ГРИГОР'ЯН БОРИС БАХШІЙОВИЧ**



**УДК 624.012.3+699.812**

**ВОГНЕСТІЙКІСТЬ СТИСНУТИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ  
ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМАХ ПОЖЕЖІ, БЛИЗЬКИХ ДО РЕАЛЬНИХ**

**05.23.01 – будівельні конструкції,  
будівлі та споруди**

**АВТОРЕФЕРАТ  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Харків – 2001**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі залізобетонних та кам'яних конструкцій Харківського державного технічного університету будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник** – доктор технічних наук, професор  
**Фомін Станіслав Леонідович**,  
професор кафедри залізобетонних  
та кам'яних конструкцій Харківського  
державного технічного університету  
будівництва і архітектури

**Офіційні опоненти:**

- доктор технічних наук, професор **Кричевський Олександр Павлович**,  
професор кафедри залізобетонних конструкцій  
Донбаської державної академії будівництва і архітектури;
- кандидат технічних наук, доцент **Стельмах Олег Адамович**,  
заступник начальника кафедри пожежної профілактики Академії  
пожежної безпеки України.

**Провідна установа:**

Український зональний науково-дослідний і проектний інститут по цивільному будівництву (ВАТ “КиївЗНДІЕП”) Державного комітету України у справах будівництва, архітектури і житлової політики (м. Київ), комплексний відділ конструкцій для звичайних та складних умов будівництва.

Захист відбудеться «26» червня 2001 р., о 12 годині, на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.02 Харківської державної академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майд. Фейербаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківської державної академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майд. Фейербаха, 7.

Автореферат розісланий «22» травня 2001 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
кандидат технічних наук, доцент



Єрмак Є.М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Забезпечення необхідних меж вогнестійкості будівельних конструкцій пов'язане з удосконаленням методів розрахунку на основі експериментального вивчення фізико-механічних характеристик матеріалів та роботи їхніх елементів у процесі нагрівання. Статистичні дані по Україні показують, що 3/4 від загального числа пожеж відбувається в будинках і спорудах, виконаних із залізобетонних конструкцій.

Збільшення кількості пожеж, значні матеріальні збитки, що ними завдаються, відсутність достатньої випробувальної бази в Україні, довготривалість і дорожнеча вогневих випробувань залізобетонних конструкцій зумовлюють важливість задач з удосконалення методів розрахунку їхньої вогнестійкості.

Розрахунок вогнестійкості стиснутих елементів у даний час проводиться за режимом стандартної пожежі. Реальна пожежа має часовий інтервал підйому температури до максимальної величини та інтервал її зниження. Практика показує, що вичерпання несучої здатності може настати також у процесі охолодження. Відомий французький будівельник Анрі Лосьє описує трагічний випадок на пожежі складу рідких горючих речовин, при якому раптово обрушилися залізобетонні колони під дією струменів води, що стало причиною смерті декількох пожежників.

Розроблена в ХДТУБА методика розрахунку міцності залізобетонних перерізів з урахуванням реальних законів деформування та результати дослідження впливу інтенсивного високотемпературного нагрівання на характер повних діаграм “ $\sigma - \varepsilon$ ” бетону й арматури показують, що існуючі методи розрахунку потребують істотного коригування.

Міцність стиснутих залізобетонних елементів має пріоритетне значення у вогнестійкості будинку в цілому, оскільки може спричинити його руйнування. У зв'язку з цим вивчення дійсної картини їх роботи при інтенсивному нагріванні і наступному охолодженні в реальному температурному режимі та розробка уточненої методики її оцінювання є актуальним напрямом.

Обраний напрям досліджень відповідає задачам забезпечення пожежної безпеки об'єктів та переліку проблем науково-технічного розвитку Державної пожежної охорони МВС України.

**Метою дослідження** є створення методів оцінювання вогнестійкості стиснутих залізобетонних елементів при температурних режимах, близьких до реальних.

### **Задачі дослідження.**

1. Розробити більш точну методику чисельного розрахунку температурних полів в перерізах залізобетонних елементів при багатобічному нагріві та охолодженні, яка враховує мінливість

характеристик теплопереносу та виявити нові фактори впливу на несучу здатність у фазі затухання пожежі.

2. Розробити методику та провести експериментальні дослідження міцнісних та деформативних характеристик бетону та арматури при нагріванні та охолодженні.

3. Розробити методику розрахунку вогнестійкості стиснутих залізобетонних елементів конструкцій з урахуванням фізичної нелінійності бетону й арматури при нагріванні та охолодженні.

4. Провести за розробленою методикою чисельні дослідження напружено-деформованого стану стиснутих залізобетонних елементів при реальних режимах пожежі щодо виявлення умови втрати несучої здатності на стадії загасання пожежі.

5. Розробити методику натурних вогневих випробувань стиснутих залізобетонних елементів стосовно до реальних температурних режимів пожежі.

6. Провести експериментальні дослідження стиснутих залізобетонних колон при різноманітних режимах пожежі, виявити вплив нагрівання та охолодження на температурні зусилля, деформації та вогнестійкість.

7. Розробити пропозиції щодо нормування вогнестійкості стиснутих залізобетонних елементів в умовах різноманітних температурних режимів пожежі.

**Об'єкт дослідження** – вогнестійкість залізобетонних стиснутих елементів.

**Предмет дослідження** – стиснуті залізобетонні елементи прямокутного поперечного перерізу з випадковим ексцентриситетом з урахуванням поздовжнього вигину при їхній гнучкості  $\lambda \leq 70$  ( $l_0 = 20h$ ) при високотемпературному нагріванні.

**Методи дослідження** – розробка методів розрахунку несучої здатності стиснутих залізобетонних елементів з урахуванням стадії активного горіння і стадії охолодження реальних режимів пожежі на основі розв'язання нелінійних рівнянь теплопровідності, обліку фізичної нелінійності бетону й арматури при нагріванні, застосування чисельних досліджень і натурних вогневих випробувань залізобетонних колон.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

– проведено чисельне моделювання температурних полів у перерізах залізобетонних елементів при багатобічному нагріванні й остиганні на основі уточненої методики розрахунку, яка враховує мінливість характеристик теплопереносу; виявлено нові фактори, що знижують несучу здатність після припинення пожежі;

– отримані експериментальні дані про вплив нагрівання та охолодження на діаграми деформування важкого бетону й арматури;

- розроблено методику розрахунку вогнестійкості стиснутих залізобетонних елементів конструкцій з урахуванням фізичної нелінійності бетону й арматури при нагріванні;
- у результаті проведених за розробленою методикою чисельних досліджень напружено-деформованого стану стиснутих залізобетонних елементів при реальних режимах пожежі виявлено умови втрати несучої здатності на стадії загасання пожежі;
- розроблено методику натурних вогневих випробувань стиснутих залізобетонних елементів стосовно до реальних температурних режимів пожежі, методику лабораторних досліджень міцнісних і деформативних характеристик бетону при нагріванні та наступному остиганні;
- отримані експериментальні дані про поведінку стиснутих залізобетонних колон при різних температурних режимах пожежі, нові дані про вплив нагрівання й охолодження на температурні зусилля, деформацію та вогнестійкість;
- розроблено методику доведення реального температурного режиму пожежі до стандартного.

**Вірогідність отриманих результатів** підтверджується коректністю методики, сучасним рівнем експериментальних досліджень, використанням методів математичної статистики при обробці результатів та виведення емпіричних формул, задовільним збігом результатів проведених експериментів з розрахунковими даними за розробленими методиками, використанням останніх досягнень нелінійної теорії залізобетону.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що розроблена методика, алгоритми розв'язання і програми на ПЕОМ дозволяють підвищити точність розрахунку вогнестійкості стиснутих залізобетонних конструкцій, розробити раціональні конструктивні рішення із забезпеченою межею вогнестійкості.

**Впровадження результатів роботи.** Розроблені та подані в дисертації методики розрахунку вогнестійкості залізобетонних стиснутих елементів впроваджені в проект ДБН В.1.1 “Захист від пожежі будинків і споруд. Пожежно-технічна класифікація та загальні вимоги”, а також використані при розробці інструктивних документів та методичних рекомендацій для курсантів і слухачів Академії пожежної безпеки України, ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля МВС України.

**Особистий внесок здобувача** полягає у:

- розробці методики розрахунку температурних полів у перерізах залізобетонних конструкцій при багатобічному короткочасному інтенсивному нагріванні й охолодженні;
- експериментальних дослідженнях впливу нагрівання та охолодження на діаграми деформування важкого бетону й арматури;
- запропонованій методиці розрахунку вогнестійкості стиснутих залізобетонних елементів з урахуванням фізичної нелінійності матеріалів при нагріванні;

- чисельному дослідженні напружено-деформованого стану стиснутих залізобетонних елементів при режимах реальних пожеж, що включають стадію загасання;
- розробленій методиці натурних вогневих випробувань стиснутих залізобетонних елементів та методиці лабораторних досліджень механічних характеристик бетону при нагріванні та наступному остиганні стосовно до режиму реальної пожежі;
- експериментальних дослідженнях стиснутих залізобетонних колон при різних температурних режимах пожежі, близьких до реальних;
- розробці методики доведення реального температурного режиму пожежі до стандартного;
- впровадженні розроблених результатів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідалися на науково-технічних конференціях у ВНДПО, ВПТШ МВС СРСР у 1982-1983 р., на науково-технічній раді ВПТШ у 1984 р., наукових конференціях ЧПБ і ХДТУБА впродовж 1983–2001 рр.

**Публікації.** Основний зміст роботи опублікований у 6 друкованих працях.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, що включають експериментальну і теоретичну частини, висновків, списку використаних джерел із 137 найменувань і 2 додатків. Повний обсяг роботи становить 168 сторінок, у тому числі 87 сторінок тексту, 79 рисунків, 4 таблиці.

Тема дисертації, методики експериментальних досліджень і проведення вогневих випробувань залізобетонних колон запропоновані та виконані під керівництвом доктора технічних наук, професора Анатолія Івановича Яковлева.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У першому розділі** проведений аналіз застосовуваних методів розрахунку вогнестійкості стиснутих залізобетонних елементів, стану нормування їхньої вогнестійкості, обліку температурного режиму і тривалості пожежі при нормуванні, фізичної нелінійності при визначенні меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій.

Дослідження Бартелемі Б., Башкирцева М.П., Бушуєва І.С., Гусакова В.М., Демчини Б.Г., Жукова В.В., Зігер-Корна В.Н., Ільїна Н.О., Колякова М.Й., Крюппа Ж., Мальхотри Х., Мілованова А.Ф., Мурашова В.І., Панюкова Е.Ф., Пчелінцевим В.О., Пчелінцева О.В., Ройтмана В.М., Романенкова І.Т., Чіхладзе Е.Д. Шмуклера В.С., Яковлева А.І. та ін. показали, що температурні режими реальних пожеж у будинках істотно відрізняються від “стандартного”, при цьому прогрів і втрата несучої здатності стиснутих елементів не відповідають нормативним.

Гвоздьовим А.А. і Байковим В.М. відзначалося, що уточнення теорії залізобетону в стадії, близькій до руйнування, може бути здійснене з використанням повної діаграми “ $\sigma - \epsilon$ ” бетону. Визначенням параметрів повної діаграми присвячені роботи Бамбури О.М., Барашикова А.Я., Климова Ю.А., Голишева А.Б., Кричевського О.П. та ін., на основі яких розроблені пропозиції до нормативних документів.

Як показують результати досліджень Фоміна С.Л., Кулешова М.М., Стельмаха О.А., уточнення розрахунку вогнестійкості та залишкової міцності варто шукати шляхом урахування повних діаграм “ $\sigma - \epsilon$ ” бетону й арматури при нагріванні. Установлено, що при нагріванні знижується міцність бетону на стиск, знижується початковий модуль пружності, збільшується гранична стисливість. Урахування реальних законів деформування при нагріванні дозволило розробити нові методики розрахунку вогнестійкості залізобетонних стиснутих конструкцій та конструкцій, що згинаються, за нормальними перерізами, встановити ряд особливостей роботи залізобетонних конструкцій при нагріванні, уточнити оцінку їхньої вогнестійкості та залишкової міцності.

Проведений аналіз показав, що в даний час вогнестійкість стиснутих залізобетонних елементів нормується і визначається стосовно до стандартного температурного режиму пожежі, що не завжди відповідає сучасним вимогам пожежного захисту будинків та споруд. Поведінку залізобетонних елементів в умовах температурних впливів, близьких до реальних пожеж, дотепер досліджено недостатньо. Відомі розрахункові методи не дозволяють з необхідною точністю визначати вогнестійкість стиснутих елементів в умовах пожежі, відмінної від “стандартної”.

Для створення методів оцінювання вогнестійкості стиснутих залізобетонних елементів при температурних режимах, близьких до реальних, сформульовані задачі дослідження.

**Другий розділ** присвячений розробці уточненої методики розрахунку розподілу температури в перерізах залізобетонних конструкцій при багатобічному нагріванні й остиганні з урахуванням залежностей характеристик теплопереносу від температури. Розв’язання теплотехнічної задачі вогнестійкості будівельних конструкцій при температурному режимі реальної пожежі пропонується проводити, використовуючи скоригований вираз для стандартної пожежі на висхідній вітці залежності “температура – час” за методикою ВНДПО. У цьому випадку корекція проводиться введенням коефіцієнта  $\psi$  у залежність стандартної пожежі:

$$t_p - t_n = 345 \cdot \psi \cdot \lg(8\tau + 1) \quad (1)$$

На спадній вітці (стадії загасання пожежі) зниження температури навколишнього середовища приймається за лінійною залежністю, запропонованою в роботі Лі Т.Т.:

$$t_p = -600 \left( \frac{\tau}{\tau_{max}} - 1 \right) + t_{max}, \quad (2)$$

де  $t_p$  – температура реальної пожежі, °C;

$\tau$  – час від початку пожежі, хв.;

$\psi$  – коефіцієнт коригування;

$\tau_{max}$  – час досягнення максимальної температури, хв.;

$t_{max}$  – максимальна температура середовища, °C.

Значення вказаних параметрів можна визначити за існуючою методикою залежно від геометричних параметрів приміщення (площі горизонтальних і вертикальних прорізів, площі поверхні огорожень, середньої висоти вертикальних прорізів), матеріалу огороження, значення пожежного навантаження. За значенням  $\tau_{max}$  із залежності для стандартної пожежі визначається  $t_c$  і потім коефіцієнт  $\psi$  за формулою:

$$\psi = \frac{t_{max}}{t_c}. \quad (3)$$

Для розрахунку температурних полів у перерізах залізобетонних елементів прямокутного перерізу було модернізовано розроблену в ХДТУБА програму чисельного розв'язання на ПК нелінійного диференціального рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} \rho c(t) = \left( \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \right) \left[ \lambda(t) \left( \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial t}{\partial y} \right) \right], \quad (4)$$

у якому коефіцієнти питомої теплоємності  $c$ , кДж/(кг °C) і теплопровідності  $\lambda$ , Вт/(м °C) визначаються залежностями:

$$\lambda = 1,2 - 0,00035t \quad c = 0,71 + 0,00083t. \quad (5)$$

Різниця схема рівняння (4) будується в такий спосіб. Елементарним об'ємом у цьому випадку є прямокутник зі сторонами  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ , для якого



$$\rho C_{ef} \frac{\partial \bar{a}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \bar{a}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial \bar{a}}{\partial y} \right). \quad (6)$$

Інтегруючи за об'ємом 2D елементарної області, одержимо:

$$\int_{x_w}^{x_e} dx \int_{y_s}^{y_n} dy \rho C_{ef} \frac{\partial \bar{a}}{\partial \tau} = \int_{x_w}^{x_e} dx \int_{y_s}^{y_n} dy \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (j_x) + \frac{\partial}{\partial y} (j_y) \right\},$$

$$\Delta x \Delta y \cdot \rho C_{ef} (t_p) \cdot \frac{\partial \bar{a}_p}{\partial \tau} \approx \Delta y \cdot j_x \Big|_{x_w}^{x_e} + \Delta x \cdot j_y \Big|_{y_s}^{y_n} = \Delta y (j_{xe} - j_{xw}) + \Delta x (j_{yn} - j_{ys})$$

остаточно:

$$\frac{\partial \bar{a}_p}{\partial \tau} = \frac{f}{\rho C_{ef}} \left\{ \Delta x (j_{xe} - j_{xw}) + \Delta y (j_{yn} - j_{ys}) \right\}. \quad (7)$$

Визначаємо потоки в такий спосіб:

$$j_{xe} = \lambda \left( \frac{t_p + t_E}{2} \right) \cdot \left( \frac{t_E - t_p}{\Delta x} \right) \quad j_{xw} = \lambda \left( \frac{t_p + t_w}{2} \right) \cdot \left( \frac{t_p - t_w}{\Delta x} \right), \quad (8)$$

$$j_{yn} = \lambda \left( \frac{t_N + t_p}{2} \right) \cdot \left( \frac{t_N - t_p}{\Delta y} \right) \quad j_{ys} = \lambda \left( \frac{t_p + t_s}{2} \right) \cdot \left( \frac{t_p - t_s}{\Delta y} \right). \quad (9)$$

Така форма запису дозволяє значно зменшити кількість арифметичних операцій порівняно з традиційною кінцево-різницевою апроксимацією. Розроблено програму розрахунку в середовищі Excel For Windows, яка функціонує під керуванням інтерактивної оболонки, що дозволяє візуально контролювати обчислювальний процес та у випадку прояву нестійкості змінювати крок інтегрування за часом.

За розробленою методикою були виконані розрахунки для чотирьох температурних режимів розвитку пожежі, відмінних від стандартного, при коефіцієнтах  $\psi = 0,7; 0,9; 1; 1,2$ . При цьому час досягнення максимальної температури в приміщенні змінювали в діапазоні від 15 до 360 хвилин.

На рис. 1 показано динаміку формування температурного поля в перерізі колони 300×300 мм при чотирибічному нагріванні та при реальному температурному режимі ( $\psi = 0,9$ ;  $\tau_{max} = 90$  хв.). На стадії загоряння і розвитку пожежі – в інтервалі часу  $\tau = 0 - 90$  хв. – відбувається нерівномірне нагрівання перерізу (рис. 1, а). При  $\tau_{max} = 90$  хв. температура ребер колони досягає 906 °С, температура центра перерізу – 131 °С. На стадії загасання пожежі периферійні волокна перерізу знижують температуру, в той час як волокна центральної частини перерізу продовжують нагріватися. Після години остигання ( $\tau = 150$  хв.) температура ребер колони становила 516 °С, температура центра перерізу – 308 °С (рис. 1, б). Після двох з половиною годин остигання ( $\tau = 240$  хв.) температура в ребрах знизилася до 62 °С, а температура центра перерізу досягла 426 °С (рис. 1, в).

Як відомо, втрата бетоном міцності має необоротний характер: матеріал “запам’ятовує” вплив температури, знижуючи міцність і збільшуючи деформативність. При охолодженні периферійні волокна вже знизили свою міцність, а волокна центральної частини в результаті триваючого нагрівання також втрачають її в часі. У результаті істотно знижується вогнестійкість перерізу, яка не прогнозується розрахунками за існуючою методикою.

Виявлене зниження міцності перерізу в період спаду температури навколишнього середовища може призвести до обвалення стиснутих залізобетонних елементів.

У третьому розділі розроблено методику розрахунку вогнестійкості стиснутих залізобетонних елементів з випадковим ексцентриситетом при заданому режимі пожежі. Розрахунок міцності залізобетонних перерізів проведений з урахуванням залежностей повних діаграм “□□□” бетону й арматури від температури з умови:

(10)

Напруження  $\sigma_{bij}$  у бетоні при його навантаженні в нагрітому стані визначаються такими залежностями:

$$\varepsilon_b < 0 \text{ [стиск]}$$

$$\text{при } \varepsilon_{bu} \leq \varepsilon_b \leq 0 \quad \sigma_{bT} = R_{bT} \left[ a_1 \eta_T + a_2 \eta_T^2 + a_3 \eta_T^3 + a_4 \eta_T^4 + a_5 \eta_T^5 \right], \quad (11)$$

$$\text{де} \quad \eta_T = \frac{\varepsilon_{bT}}{\varepsilon_{bRT}}, \quad (12)$$

$$\text{при } \varepsilon_b < \varepsilon_{bu} \quad \sigma_b = 0, \quad (13)$$

$$\varepsilon_b > 0 \text{ [розтягання]}$$

$$\text{при } \varepsilon_{bRt} \geq \varepsilon_b \geq 0 \quad \sigma_b = \varepsilon_b E_b, \quad (14)$$

$$\text{при } \varepsilon_{btu} \geq \varepsilon_b \geq \varepsilon_{bRt} \quad \sigma_b = Rbt, \quad (15)$$

$$\text{при } \varepsilon_b > \varepsilon_{btu} \quad \sigma_b = 0. \quad (16)$$

Коефіцієнти полінома для застосованого важкого бетону при  $R_{b,20} = 31$  МПа:  $a_1 = 2,143$ ;  $a_2 = -1,118$ ;  $a_3 = -0,205$ ;  $a_4 = 0,217$ ;  $a_5 = -0,023$ .

Параметри, що входять до рівнянь (11)...(16), змінюються залежно від температури згідно з такими емпіричними формулами:

$$Rb = \gamma_{bT} R_b. \quad (17)$$

За коефіцієнт умов роботи досліджуваного нагрітого бетону при стиску за результатами експериментальних досліджень приймемо:

$$\gamma_{bT} = -8 \cdot 10^{-7} t^2 - 0,0006 t + 1,0213, \quad (18)$$

$$Rbt = \gamma_{bT} R_{bt}. \quad (19)$$

За коефіцієнт умов роботи бетону на розтягання приймемо:

$$\gamma_{bt} = 1,008 - 1,1 \cdot 10^{-3} t + 2,214 \cdot 10^{-7} t^2 + 10,4 \cdot 10^{-10} t^3, \quad (20)$$

$$E_{bt} = \beta_{bT} E_b. \quad (21)$$

Коефіцієнт, що враховує зниження початкового модуля пружності при нагріванні:

$$\beta_b = 1,009 - 1,5 \cdot 10^{-3} t - 4,67 \cdot 10^{-7} t^2 + 1,01 \cdot 10^{-9} t^3, \quad (22)$$

$$\varepsilon_{bRT} = Kb \varepsilon_{bR}. \quad (23)$$

Коефіцієнт, що враховує збільшення граничної стисливості при нагріванні за результатами досліджень нагрітого бетону:

$$K_{bT} = 2 \cdot 10^{-8} t^3 - 1 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,003 t + 0,9119. \quad (24)$$

**Напруги  $\sigma_{bij}$  у навантаженому до нагрівання бетоні (тобто з урахуванням температурної повзучості, що швидко натікає)** визначаються залежностями (11 – 24) з таким коригуванням:

замість (18) для коефіцієнта умов роботи  $\gamma_{bT}$  вводиться формула:

$$\gamma_{bT} = -1,2 \cdot 10^{-6} t^2 - 2,98 \cdot 10^{-5} t + 1,01269, \quad (25)$$

замість (24) для коефіцієнта  $K_{bT}$  вводиться формула:

$$K_{bT} = 1,1 \cdot 10^{-5} t^2 + 6,3 \cdot 10^{-5} t + 0,789. \quad (26)$$

**Напруги  $\sigma_{sij}$  в арматурі**, що має фізичну границю текучості:

$\varepsilon_s < 0$  [стиск]

при  $\varepsilon_{scu} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sc}$  або  $\varepsilon_{bu} \leq \varepsilon_s \leq Rsc/E_s$

$$\sigma_s = Rsc, \quad (27)$$

при  $\varepsilon_s < \varepsilon_{bu}$   $\sigma_s = 0$ , (28)

де при  $20\text{ }^\circ\text{C} \leq t \leq 400\text{ }^\circ\text{C}$

$$R_s = R_{s0}, \quad (29)$$

при  $400\text{ }^\circ\text{C} \leq t \leq 800\text{ }^\circ\text{C}$

$$R_s = \gamma_s R_{s0} = (-0,61 + 1,26 \cdot 10^{-2} t - 2,81 \cdot 10^{-5} t^2 + 1,651 \cdot 10^{-8} t^3) R_{s0}, \quad (30)$$

при  $t > 800\text{ }^\circ\text{C}$

$$\gamma_{st} = 0, \quad (31)$$

$$E_s = E_{s0} \beta_s = (1,01 - 6,436 \cdot 10^{-4} t + 1,1 \cdot 10^{-6} t^2 - 1,3 \cdot 10^{-9} t^3) E_{s0}. \quad (32)$$

**Розрахунок вогнестійкості залізобетонних елементів** за нормальними перерізами пропонується проводити ітераційним методом, дискретизуючи переріз при двомірному тепловому потоці у вигляді прямокутних елементів з урахуванням таких передумов:

- приймається гіпотеза плоских перерізів;
- міцність перерізу визначається максимальним зусиллям при варіюванні величини деформацій плоского перерізу.

Визначивши розподіл температур у центрі ваги дискретних елементів, на які розчленовується переріз, приймаємо гіпотезу плоских перерізів у вигляді:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{tot}}. \quad (33)$$

Напруги в бетоні  $\sigma_{bij}$  і арматурі  $\sigma_{sij}$  визначаються за формулами (11) – (32) за заданими деформаціями:

$$\varepsilon_{bij} = \varepsilon_{\text{tot}} - \varepsilon_{btij} = \varepsilon_{\text{tot}} - \alpha_{bTij} (t_{ij} - t_0), \quad (34)$$

$$\varepsilon_{sij} = \varepsilon_{\text{tot}} - \varepsilon_{stij} = \varepsilon_{\text{tot}} - \alpha_{sTij} (t_{ij} - t_0), \quad (35)$$

де  $\alpha_{bTij}$ ,  $\alpha_{sTij}$  – коефіцієнти лінійного розширення бетону й арматури елемента відповідно;

$\varepsilon_{btij}$ ,  $\varepsilon_{stij}$  – вільні температурні деформації бетону й арматури елемента;

$t_{ij}$ ,  $t_0$  – температура в центрі  $i,j$ -того елемента та початкова температура.

Особливістю розрахунку міцності на спадній вітці температурного режиму пожежі є необхідність урахування двох температурних полів у перерізі залізобетонного елемента одночасно: температурного поля максимальних температур попереднього нагрівання фібр, що остигають, і максимальних температур фібр, що продовжують нагріватися, і реального температурного поля для даного моменту часу. Перше температурне поле  $t_1(x,y)$  визначає вигляд діаграм  $\sigma_b(\varepsilon, t)$  і  $\sigma_s(\varepsilon, t)$ , друге поле  $t_2(x,y)$  – дійсні вільні температурні деформації.

Другою особливістю розрахунку є врахування відновлення міцності арматури при остиганні. У міру втрати міцності арматури відбувається перерозподіл напружень з арматури на бетон, що враховується механізмом повних діаграм деформування бетону й арматури. У момент повної втрати

міцності ( $t_s > 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ) усе зусилля  $N_{ser}$  сприймає бетон. При остиганні міцність арматури відновлюється, але арматура виведена з роботи і може сприймати тільки ті зусилля, що будуть відповідати додатковим деформаціям плоского перерізу. Ці деформації будуть збільшуватися у зв'язку з триваючим нагріванням центральних волокон перерізу та відповідним збільшенням їх деформативності. Діаграми “ $\sigma$ – $\varepsilon$ ” арматури при цьому будуть відрізнятися від вихідних.

Ітераційний процес визначення міцності залізобетонного перерізу полягає в підборі максимального значення зусилля  $N_{ut}$  при послідовному варіюванні значень відносної деформації плоского перерізу  $\varepsilon_{tot}$ . На кожному кроці ітерації уточнюється значення коефіцієнта поздовжнього вигину  $\varphi$ .

**Методика врахування коефіцієнта поздовжнього вигину  $\varphi$**  полягає в наступному. Обчислюються січні модулі деформації бетону й арматури за повними діаграмами “ $\sigma$ – $\varepsilon$ ” бетону й арматури:

$$E_{bc,t} = \frac{\sigma_{bij}}{\varepsilon_{tot}}, \quad E_{sc,t} = \frac{\sigma_{sij}}{\varepsilon_{tot}}, \quad (36)$$

визначається зведена за цими модулями площа перерізу залізобетонного елемента:

$$A_{red} = \sum_i^n \sum_j^m A_{red,ij} + \sum_i^n \sum_j^m A_{s,red}, \quad (37)$$

де

$$A_{red,ij} = A_{ij} \cdot \frac{E_{bc,t}}{E_{bc,20}}, \quad A_{s,ij} = A_{s,ij} \cdot \frac{E_{sc,t}}{E_{sc,20}}.$$

Далі, відповідно до нормативної методики, визначаються зведені розміри перерізу. Для квадратного перерізу зведена ширина дорівнює:

$$b_{red} = \sqrt{A_{red}}. \quad (38)$$

Залежно від відношення розрахункової довжини елемента до його зведеної ширини визначається коефіцієнт поздовжнього вигину  $\varphi_l$  за формулою:

$$\varphi_l = \varphi_b + 2(\varphi_s + \varphi_b) \cdot \alpha_t. \quad (39)$$

Коефіцієнти  $\varphi_b$ ,  $\varphi_s$  та  $\alpha_t$  приймаються залежно від гнучкості елемента.

За допомогою розробленої методики і програми розрахунку на ПК був проведений розрахунковий експеримент з оцінювання зміни несучої здатності центрально стиснутих залізобетонних колон при різних температурних режимах пожежі, що враховують не тільки стадію розвитку, а й стадію загасання.

Розрахунки виконані для колон квадратного поперечного перерізу з розмірами 0,3x0,3 м і 0,4x0,4 м, що обігріваються з чотирьох сторін. Колони симетрично армовані чотирма стержнями діаметром  $d = 25$  мм; арматура класу А-III. Бетон важкий, на гранітному заповнювачі; об'ємна маса  $\rho = 2330$  кг/м<sup>2</sup>.

З огляду на симетричність поперечного перерізу колони, розрахунок зміни температурного і міцнісного полів виконували для чверті перерізу. На розрахунковий переріз накладали сітку з квадратними комірками розміром  $\Delta X = 0,015$  м – для колони перерізом 0,3x0,3м і  $\Delta X = 0,02$  м – для колони з поперечним перерізом 0,4x0,4м.

Зв'язок між напруженнями і деформаціями бетону й арматури визначали за отриманими експериментальними діаграмами “ $\sigma$ -  $\epsilon$ ” для різних режимів роботи: а) навантаженні після нагрівання і б) нагрівання навантажених зразків.

Розрахунки зміни температури за перерізом і несучою здатністю колон перерізом були виконані для чотирьох температурних режимів розвитку пожежі, відмінних від стандартного, при коефіцієнтах  $\psi = 0,7; 0,9; 1; 1,2$ . При цьому час досягнення максимальної температури в приміщенні варіювалося в діапазоні від 15 до 360 хвилин.

На рис. 2 показані епюри напружень у бетоні й арматурі для стадій, близьких до руйнування, при чотирибічному нагріванні при реальному температурному режимі ( $\psi = 0,9; \tau_{max} = 90$  хв.). У холодному стані при  $\sigma = 1$  напруження в бетоні рівномірно розподілені по перерізу, їхня величина дорівнює  $R_n = 31$  МПа, напруження в арматурі дорівнюють  $R_s = 365$  МПа і несуча здатність перерізу становить  $N_u = 3,5769$  МН. При максимальному нагріванні ( $\tau_{max} = 90$  хв.) напруження в бетоні розподіляються нерівномірно: напруження у фібрах ребер дорівнюють 0,16 МПа, максимальні напруження на поверхні становлять 6,41 МПа, напруження в центрі – 28,91 МПа, напруження в арматурі  $\sigma_s = 140,55$  МПа, міцність перерізу знизилася до  $N_u = 1,75$  МН (рис. 2, а). На стадії загасання пожежі периферійні волокна перерізу знижують температуру, але у зв'язку з необоротністю втрати міцності напруження в них не збільшуються, волокна центральної частини перерізу продовжують нагріватися, їхня міцність також знижується. Після години остигання ( $\tau = 150$  хв.) напруження в центрі становлять 23,488 МПа, напруження в арматурі  $\sigma_s = 0$  МПа, міцність перерізу знизилася до  $N_u = 1,22$  МН (рис. 2, б). Після двох з половиною годин остигання  $\tau = 240$  хв.) напруження в центрі становлять 18,478 МПа, напруження в арматурі  $\sigma_s = 0$  МПа, міцність перерізу знизилася до  $N_u = 1,06$  МН (рис. 2, в).

На основі розробленої методики розрахунку вогнестійкості залізобетонних конструкцій для реального режиму пожежі та вогневих випробувань залізобетонних колон запропонований метод переходу, в якому як перехідний критерій пропонується використовувати абсолютну величину несучої здатності колони при нагріванні. Фізична основа методу полягає у визначенні часу вичерпання несучої здатності елемента при стандартному режимі за часом досягнення такої ж самої несучої здатності при реальній пожежі.

Реалізація методу полягає в тому, що, попередньо оцінивши тривалість можливої пожежі та величину несучої здатності елемента в граничному стані, можна за допомогою графіка зміни несучої здатності конструкції при “стандартному” режимі пожежі визначити еквівалентний час дії цієї пожежі (фактична межа вогнестійкості конструкції  $P_{\phi}$ ).

Методика розрахунку вогнестійкості залізобетонних конструкцій для реального режиму пожежі включає завдання вихідних параметрів можливої пожежі ( $\psi$  - коефіцієнта коригування стандартної кривої “температура – час” і  $\tau_{max}$  – часу досягнення максимальної температури), розрахунок нестационарного температурного поля в перерізі колони з урахуванням фази остигання, визначення її несучої здатності під час пожежі й остигання та визначення межі вогнестійкості за величиною нормативного навантаження.

Проведено чисельне дослідження й оцінювання результатів експериментів вогнестійкості залізобетонних колон при режимі пожежі, відмінному від стандартного, що включає перевірку розробленої методики, оцінювання часу продовження теплопереносу в колонах на стадії загасання пожежі, зміни несучої здатності колон різного поперечного перерізу при різних температурних режимах пожежі з урахуванням стадії загасання, її впливу на процес зниження несучої здатності колон, визначення еквівалентного часу стандартної пожежі до руйнування колон.

На рис. 3 подані результати розрахунків зміни температури в трьох найбільш характерних точках перерізу колони (крива 2 – температура поверхні, крива 3 – температура арматури, крива 4 – температура в центрі) розміром 0,3x0,3 м та зміни її несучої здатності (крива 5) при режимі пожежі з коефіцієнтом  $\psi = 0,7$  (крива 1) і двох величинах часу досягнення максимальної температури в приміщенні при пожежі  $\tau_{max} = 15$  хв. (рис. 3, а) і  $\tau_{max} = 120$  хв. (рис. 3, б).

З розглянутих графіків видно, що на стадії загасання пожежі процес теплопереносу продовжується. Це призводить до подальшого прогріву внутрішніх шарів перерізу колони, додаткового істотного зниження її несучої здатності, що на стадії загасання, як підтвердили натурні вогневі випробування, може спричинити її обвалення.

На рис. 4 показані результати розрахунку зміни несучої здатності колони перерізом  $0,3 \times 0,3$  м під час пожежі, температурний режим якої відрізняється від стандартного на коефіцієнт  $\psi = 0,9$ , при різній тривалості розвитку пожежі  $\tau_{\max}$ . Вони зіставлені зі зміною несучої здатності колони при “стандартній” пожежі (крива 6). Наприклад, якщо нормативне навантаження на колону становить  $N_n = 0,8$  МН, то на стадії розвитку пожежі конструкція може обрушитися через 135 хв. (крива 5). Якщо тривалість стадії розвитку пожежі становитиме  $\tau_{\max} = 120$  хв., то конструкція обрушиться вже на стадії загасання пожежі – через 150 хв. від її початку (крива 4). Причому зазначені інтервали часу пожежі (135 і 150 хв.) будуть еквівалентні між собою й еквівалентні впливу “стандартної” пожежі на колону протягом 114 хв.

Результати розрахунку і натурних вогневих випробувань свідчать про обґрунтованість запропонованої методики переходу від фактичного часу можливої пожежі до еквівалентного часу “стандартної” пожежі.

**У четвертому розділі** викладені результати експериментального обґрунтування запропонованої методики розрахунку вогнестійкості. Проведено експериментальне дослідження міцнісних і деформативних характеристик бетону при нагріванні й остиганні. Випробували порожні циліндри висотою 300 мм, із зовнішнім діаметром 75 мм, внутрішнім – 25 мм, виготовляли з важкого бетону на гранітному щебені. Установка для визначення міцності та деформативності бетону складалася з важільної системи вагою 13 т, зблокованої з муфельною електропіччю. У піч був поміщений вертикальний муфель потужністю 5-6 кВт для обігріву зразка з боку зовнішньої поверхні. Внутрішня поверхня зразка обігрівалася нагрівачем стержневого типу (потужністю 0,5 кВт), поміщеним у порожнину циліндричного зразка. Для дослідження напружених зразків у період охолодження після нагрівання спочатку навантажували зразок до 70% від початкової циліндричної міцності, а потім нагрівали до заданої температури з наступним охолодженням. Якщо зразок не руйнувався наприкінці охолодження, то на наступному зразку збільшували величину навантаження і повторювали дослід, якщо руйнувався в період підйому температури, зменшували попереднє навантаження та повторювали дослід.

При дослідженні діаграм деформування зразки нагрівали до температур  $t = 200, 400, 600, 800$  °С, охолоджували до початкової температури  $t_0 = 20$  °С та навантажували ступінчасто приблизно від  $0,1R_c$  до руйнування. Ґрунтуючись на результатах досліджень ХДТУБА, отримали повні діаграми “ $\sigma$ - $\epsilon$ ” застосованого бетону у вигляді полінома 5 ступеня. На основі результатів досліджень складений пакет емпіричних формул для опису повних діаграм деформування бетону при нагріванні та



деформування навантаженого до нагрівання бетону, тобто з урахуванням температурної повзучості, що швидко натікає, необхідних для проведення уточнених розрахунків вогнестійкості при реальних режимах пожежі.

На рис. 5-6 представлені діаграми “ $\sigma - \epsilon$ ” бетону, які показують, що при нагріванні знижується міцність бетону на стиск і зростає його деформативність. При цьому відносні деформації стиску бетону  $\epsilon_b$ , що відповідають напруженням  $\sigma_b = R_b$ , після нагрівання до 200, 400, 600 і 800 °С становили 0,0021; 0,0038; 0,0072; 0,0161 відповідно, а призмova міцність (яка приблизно дорівнює циліндричній  $R_c$ ) дорівнювала 27,59; 19,04; 7,04; 0,634 МПа. За цими даними виведені емпіричні формули (18), (24), (25), (26) для визначення коефіцієнта умов роботи бетону при стиску  $\gamma_{bt}$  та встановлення залежності коефіцієнта  $K_{bt}$  зниження деформацій  $\epsilon_{bRt}$  від температури бетону з величиною достовірності  $R^2 = 0,9965 \dots 0,9988$ .

Виявлено, що в напружених зразках при нагріванні до заданих температур з наступним охолодженням зниження міцності менше, ніж у ненапружених.

Проведено натурні вогневі випробування колон перерізом 0,4x0,4 м і 0,3x0,3 м, висотою 3,5 м. Дослідні колони виготовляли в заводських умовах з важкого бетону з арматурою періодичного профілю класу А-III.

Випробування проводилися на установці ВНДПО, яка складається з печі розмірами 3,5x2x2 м, вантажної рами висотою 7,2 м з гідравлічним пресом і підйомно-транспортними пристроями. Установка працює на газі, що спалюється за допомогою восьми форсунок, і обладнана повітряним дуттям. Форсунки розташовані так, що полум'я не впливає безпосередньо на колони і не створює місцевого перегріву.

У процесі випробування колон на вогнестійкість вимірювали температуру у вогневій камері печі та в бетоні за допомогою хромель-алюмелевих термопар. Для визначення температури прогріву робочої арматури і бетону в різних точках перерізу (зразка) колони при виготовленні встановлювали термопари. Температуру в камері печі регулювали відповідно до потрібного температурного режиму. У процесі вогневого випробування також постійно заміряли поздовжні деформації колон за допомогою 4-х прогиномірів. Середнє арифметичне з показань прогиномірів приймали за деформації колони. При випробуванні фіксували характер і час руйнування (обвалення) колони і характерні риси поведінки матеріалів (розтріскування, вибухоподібне руйнування бетону, випинання арматури).

У результаті випробувань виявлено, що на прогрів колон значною мірою впливає температурний режим пожежі. У період охолодження навколишнього середовища колона продовжує прогріватися всередину перерізу за рахунок температурної інерції.

Виявлено, що колони руйнувалися крихко, як правило, в середній частині висоти. Обвалення колон відбувалося в результаті роздроблення бетону по всьому перерізі та випинання поздовжньої арматури назовні.

Випробування колон при різних режимах теплового впливу показало таке. Колони перерізом 0,4x0,4 м під нормативним навантаженням  $N_{ser} = 1,8$  МПа, що нагріваються за режимом, відмінним від стандартного на коефіцієнт  $\psi = 1,2$ , і тривалістю впливу високих температур до максимальних значень – 60 хв., обрушилися через 245 хв. на стадії охолодження. Така ж колона при тривалості нагріву 45 хв. не обрушилася. При режимі теплового впливу з коефіцієнтом  $\psi = 0,9$  і тривалістю нагріву 100 хв. та наступним остиганням колона втратила стійкість через 240 хв., при тривалості нагріву 90 хв. колона не обрушилася. Колони перерізом 0,3x0,3 м під нормативним навантаженням  $N_{ser} = 1,0$  МПа, при режимі  $\psi = 1,2$  і тривалості нагрівання 70 хв. обрушилися через 210 хв. на стадії охолодження, а тривалістю 60 хв. не обрушилися. При режимі  $\psi = 0,9$  і тривалості нагріву 90 хв. колона обрушилася через 270 хв., а при тривалості 70 хв. – не обрушилася.

Звідси можна зробити висновок, що максимальний режим пожежі, при якому колона не втратить свою несучу здатність протягом усього періоду нагрівання і загасання, має такі параметри. Колона перерізом 0,4x0,4 м і відсотком армування 1,2% витримує режим пожежі, відмінний від стандартного на коефіцієнт  $\psi = 1,2$ , тривалістю 45 хв, на коефіцієнт  $\psi = 0,9$  – тривалістю 90 хв. Колони перерізом 0,3x0,3 м і відсотком армування 2,2% витримують режим з коефіцієнтом  $\psi = 1,2$  тривалістю 60 хв і режим з коефіцієнтом  $\psi = 0,9$  тривалістю 70 хв. Розбіжність між результатами випробувань колон рівних перерізів, проведених при однакових значеннях нормативного навантаження та режимі пожежі, не перевищувала 10%.

Дослідним шляхом уточнена межа вогнестійкості колон: для перерізу 0,4x0,4 м при стандартному режимі пожежі - 2,5 години, а для перерізу 0,3x0,3м – 2 години.

Результати натурних вогневих випробувань залізобетонних колон щодо оцінки їхньої несучої здатності при реальних режимах пожежі показують задовільний збіг значень, розрахованих за розробленою методикою, і таких, що були отримані дослідним шляхом.

**У п'ятому розділі** описано впровадження результатів досліджень у проект ДБНВ.1.1 “Захист від пожежі будинків і споруд. Пожежно-технічна класифкація та загальні вимоги”, “Пропозиції щодо перевірки відповідності стиснутих елементів вимогам пожежної безпеки”, “Методику визначення еквівалентної тривалості стандартної пожежі”, а також результати роботи були використані при розробці інструктивних документів та методичних рекомендацій для курсантів і слухачів Академії пожежної безпеки України, ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля МВС України.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено уточнену методику розрахунку розподілу температури в перерізах залізобетонних конструкцій при багатобічному нагріванні й остиганні з урахуванням залежностей характеристик теплопереносу від температури, а також алгоритм і програму розрахунку на IBM PC/AT.

2. У результаті чисельного моделювання температурних полів у перерізах колон з використанням уточненої методики виявлено явище зниження їхньої міцності в період спаду температури навколишнього середовища, що може призвести до обвалення стиснутих залізобетонних елементів на стадії загасання пожежі.

3. Розроблено методику розрахунку вогнестійкості стиснутих залізобетонних елементів конструкцій з урахуванням фізичної нелінійності бетону й арматури при нагріванні та новий підхід до врахування впливу нагрівання на стійкість залізобетонних конструкцій з випадковим ексцентриситетом.

4. Розроблено алгоритм і програму для ПК, яка дозволяє провести розрахунок несучої здатності перерізів стиснутих залізобетонних конструкцій з урахуванням особливостей нелінійного нестационарного розподілу температури при реальному режимі пожежі.

5. За допомогою логічних функцій програма здійснює розрахунок двох температурних полів при розрахунку міцності на спадній вітці температурного режиму пожежі: температурного поля максимальних температур попереднього нагрівання фібр, що остигають, і максимальних температур фібр, що продовжують нагріватися, та реального температурного поля для даного моменту часу. За першим температурним полем  $t_1(x,y)$  визначаються напруження в бетоні й арматурі  $\sigma_b$  і  $\sigma_s$ , за другим полем  $t_2(x,y)$  розраховуються дійсні вільні температурні деформації комірок бетону й арматури. Програма передбачає реалізацію перерозподілу напружень з арматури на бетон за допомогою механізму повних діаграм деформування бетону й арматури та сприйняття тільки тих зусиль, що будуть відповідати додатковим деформаціям плоского перерізу.

6. У результаті проведених за розробленою методикою чисельних досліджень напружено-деформованого стану стиснутих залізобетонних елементів при реальних режимах пожеж виявлені умови втрати несучої здатності на стадії загасання пожежі. Показано, що стадія загасання пожежі має істотний вплив на зниження несучої здатності стиснутих елементів, на який не можна не зважати при оцінюванні вогнестійкості конструкцій при реальних температурних режимах пожежі.

7. Розроблено схеми нормування необхідних меж вогнестійкості. Запропоновано метод переходу від фактичного часу можливої пожежі до еквівалентного часу "стандартної" пожежі через фізично

обґрунтований критерій – фактичну несучу здатність нагрітого стиснутого залізобетонного елемента або через величину нормативного (робочого) навантаження на нього.

8. Проведено експериментальне дослідження міцнісних та деформативних характеристик бетону при нагріванні й остиганні. Виявлено, що в напружених зразках при остиганні зниження міцності менше, ніж у ненапружених. На основі результатів досліджень складений пакет емпіричних формул для опису повних діаграм деформування бетону при нагріванні та деформування навантаженого до нагрівання бетону, тобто з урахуванням температурної повзучості, що швидко натікає, необхідних для проведення уточнених розрахунків вогнестійкості при реальних режимах пожежі.

9. Результати натурних вогневих випробувань залізобетонних колон показали задовільний збіг розрахункових і дослідних значень оцінки їхньої несучої здатності при реальних режимах пожежі, що дозволило обґрунтувати запропонований метод розрахунку вогнестійкості. Отримано, що частина колон не обрушалася в період зростання температури середовища, а обрушалася лише на стадії загасання пожежі. На стадії охолодження внутрішні шари бетону продовжують прогріватися всередину перерізу за рахунок температурної інерції, що призводить до зменшення несучої здатності колони. Показано, що зміна несучої здатності залізобетонних колон відбувається не тільки при зростанні температури навколишнього середовища, а й при її зниженні.

10. Результати досліджень упроваджені в проект ДБН В.1.1 “Захист від пожежі будинків і споруд. Пожежно-технічна класифікація та загальні вимоги”, а також використані при розробці інструктивних документів та методичних рекомендацій для курсантів і слухачів Академії пожежної безпеки України, ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля МВС України.

## **ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНІ В ТАКИХ РОБОТАХ:**

1. Яковлев А.И., Григорьян Б.Б. Расчетная оценка поведения железобетонных колонн при режимах пожара, отличных от “стандартного” // Тепло- и массообмен в технологических процессах производства и при пожарах: Сб. научн. тр. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1983. – С. 147-153.

Особиста участь - проведено розрахункове дослідження температурних полів і зміни несучої здатності залізобетонних колон при різних коефіцієнтах приведення стандартної кривої до реального  $\psi = 0,8; 0,9; 1; 1,2$ .

2. Гринчик Ю.А., Измаилов А.С., Григорьян Б.Б. Поведение железобетонных колонн в условиях реальных температурных режимов пожара // Огнестойкость строительных конструкций: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1983. – С. 91-98.

Особиста участь - розроблена методика дослідження бетону при нагріванні й охолодженні, проведені вогневі випробування залізобетонних колон.

3. Измаилов А.С., Демехин В.Н., Григорьян Б.Б. Оценка поведения железобетонных колонн при температурных режимах пожара, учитывающих стадию затухания // Горючесть материалов и обнаружение пожаров. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1986. – С. 33-46.

Особиста участь - запропоновані наукові положення методики розрахунку міцності залізобетонних колон при температурних режимах пожежі, що враховують стадію загасання.

4. Григорьян Б.Б. Расчет огнестойкости сжатых железобетонных элементов со случайным эксцентриситетом при заданном режиме пожара // Научный вестник строительства. – Харьков: ХДТУБА, 2000. – Вып. 10. – С. 211-216.

5. Григорьян Б.Б. Нормирование требуемых пределов огнестойкости сжатых железобетонных колонн при реальном режиме пожара на экспериментальной основе // Коммунальное хозяйство городов: Республик. межведомств. науч.-техн. сб. – Вып. 8. – К.: Техніка, 2000. – С. 27-29.

6. Григорьян Б.Б. Метод приведения реального температурного режима пожара к стандартному для определения огнестойкости железобетонных конструкций // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Харьков: АО “Фолио”, 2000. – С. 53-56.

Григор'ян Б.Б. Вогнестійкість стиснутих залізобетонних елементів при температурних режимах пожежі, близьких до реальних. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Харківська державна академія залізничного транспорту, Харків, 2001.

Рукопис містить розробку уточненої методики розрахунку розподілу температури в перерізах залізобетонних конструкцій при багатобічному нагріванні й остиганні. Розроблено методику розрахунку вогнестійкості стиснутих залізобетонних елементів з урахуванням впливу нагрівання на стійкість залізобетонних конструкцій з випадковим эксцентриситетом. Дана методика виявила умови втрати несучої здатності на стадії загасання пожежі. Розроблено схеми нормування необхідних меж вогнестійкості.

Здійснено експериментальне дослідження міцнісних та деформативних характеристик бетону при нагріванні й остиганні, на основі яких складений пакет емпіричних формул для опису повних діаграм деформування бетону при нагріванні та деформування навантаженого до нагрівання бетону. Проведено експериментальне обґрунтування запропонованого методу розрахунку вогнестійкості.

**Ключові слова:** вогнестійкість, залізобетонні конструкції, пожежі, температурні поля, температурні напруження, діаграми “□□□” бетону, міцність.

Григорьян Б.Б. Огнестойкость сжатых железобетонных элементов при температурных режимах пожара, близких к реальным. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. - Харьковская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 2000.

### **Содержание диссертации.**

Обоснована актуальность, научная новизна и практическая ценность работы, дана ее общая характеристика.

**В первом разделе** проведен аналитический обзор состояния нормирования огнестойкости железобетонных конструкций, применяемых методов ее расчета, анализ температурных режимов пожара применительно к нормированию огнестойкости строительных конструкций, учету физической нелинейности бетона и арматуры. Сформулированы задачи исследования.

**Во втором разделе** разработана уточненная методика расчета распределения температуры в сечениях железобетонных конструкций при многостороннем нагреве и остывании с учетом зависимостей характеристик теплопереноса от температуры, а также алгоритм и программа расчета на IBM PC/AT. В результате численного моделирования температурных полей в сечениях колонн с использованием уточненной методики выявлено явление снижения их прочности в период спада температуры окружающей среды, что может привести к обрушению сжатых железобетонных элементов в стадии затухания пожара.

**В третьем разделе** разработана методика расчета огнестойкости сжатых железобетонных элементов конструкций с учетом физической нелинейности бетона и арматуры при нагреве, содержащая новый подход к учету влияния нагрева на устойчивость железобетонных конструкций со случайным эксцентриситетом. На ПК разработаны алгоритм и программа расчета несущей способности сечений сжатых железобетонных конструкций с учетом особенностей нелинейного нестационарного распределения температуры при реальном режиме пожара. В результате проведенных по разработанной методике численных исследований напряженно-деформированного состояния сжатых железобетонных элементов при реальных режимах пожаров выявлены условия потери несущей способности на стадии затухания пожара. Разработаны схемы нормирования требуемых пределов огнестойкости. Предложен метод перехода от фактического времени возможного пожара к эквивалентному времени “стандартного” пожара через физически

обоснованный критерий – фактическую несущую способность нагретого сжатого железобетонного элемента либо через величину нормативной (рабочей) нагрузки на него.

**В четвертом разделе** проведено экспериментальное исследование прочностных и деформативных характеристик бетона при нагреве и остывании. Получено, что в напряженных образцах при нагреве до заданных температур с последующим охлаждением снижение прочности меньше, чем в ненапряженных. На основе результатов исследований составлен пакет эмпирических формул для описания полных диаграмм деформирования бетона при нагреве и деформирования нагруженного до нагрева бетона, т. е. с учетом быстро натекающей температурной ползучести, необходимых для проведения уточненных расчетов огнестойкости при реальных режимах пожара. Проведено экспериментальное обоснование предложенного метода расчета огнестойкости. Результаты натурных огневых испытаний железобетонных колонн показывают удовлетворительное совпадение расчетных и опытных значений оценки их несущей способности при реальных режимах пожара. Результаты проведенного исследования температурных полей в колоннах в условиях нагрева и охлаждения выявили, что в период охлаждения окружающей среды колонна продолжает прогреваться вглубь сечения за счет температурной инерции. Проведенные натурные огневые испытания показали, что часть колонн не обрушалась в период подъема температуры среды, а обрушались только на стадии затухания пожара. Выявлено, что колонны разрушались хрупко, как правило, в средней части высоты, в результате раздробления бетона по всему сечению и выпучивания продольной арматуры наружу. Проведенные натурные огневые испытания показали, что изменение несущей способности железобетонных колонн происходит не только при росте температуры окружающей среды, но и при ее снижении. На несущую способность колонн влияют физико-механические свойства материалов, процент армирования колонн, а также интенсивность и продолжительность пожара. Для установления оптимальных сечений железобетонных колонн при различных режимах пожара опытным путем были определены величины фактических пределов огнестойкости образцов – колонн. Испытания подтвердили, что предел огнестойкости колонн сечением 0,4х0,4 м при стандартном режиме пожара составил 2,5 часа, а сечением 0,3х0,3 м – 2 часа. Расхождение между результатами испытаний колонн равных сечений, проведенных при одинаковых значениях нормативной нагрузки и режиме пожара, не превышало 10%.

**В пятом разделе** описано внедрение результатов исследований в проект ГСН В.1.1 “Защита от пожаров зданий и сооружений. Пожарно-техническая классификация и общие требования”, использование их при разработке инструктивных документов и методических рекомендаций для курсантов и слушателей Академии пожарной безопасности Украины, ЧИПБ им. Героев Чернобыля МВД Украины.

**Ключевые слова:** огнестойкость, железобетонные конструкции, пожары, температурные поля, температурные напряжения, диаграммы “ $\sigma - \varepsilon$ ” бетона, прочность.

Hryhorian B.B. Fire resistance of compressed reinforced concrete elements under temperature conditions close to real. – Manuscript: Dissertation on obtaining scientific degree of the candidate of engineering sciences in speciality 05.23.01 – building constructions, houses and facilities. – Kharkiv State Academy of Railway Transport, Kharkiv, 2001.

Manuscript containing the development of updated technique of temperature distribution calculations in the interceptions of reinforced concrete constructions under multilateral heating and cooling is being defended. The technique of calculation the fire resistance of compressed reinforced concrete elements, taking into account the influence of heating on stability of reinforced concrete constructions with random eccentricity, is developed. The present technique has found out conditions of loss of lifting capability at the stage of fire damping. The schemes of standardization of necessary fire resistance limits are developed.

The experimental research of concrete strength and deformative characteristics under heating and cooling was carried out. On the basis of these characteristics the package of empirical formulas for description of complete diagrams of concrete deformation under heating and deformation of loaded to heating concrete was composed. The offered technique of fire resistance calculations was experimentally substantiated.

**Key words:** fire resistance, reinforced concrete constructions, fires, temperature fields, temperature tensions, diagrams “ $\sigma - \varepsilon$ ” of concrete, strength.