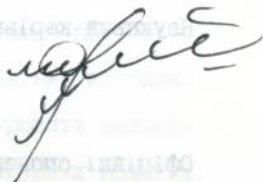


ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

БУДІВНИЦТВА та АРХІТЕКТУРИ

На правах рукопису

Кулешов Микола Миколайович



Напружено-деформований стан залізобетонних вигинаємих елементів при різноманітних температурних режимах пожежі з урахуванням охолодження водяними струменями

05. 26. 02 Пожежна безпека

05. 23. 01 Будівельні конструкції, будови та споруди

### А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття вченого  
ступеня кандидата технічних наук

Харків - 1998

674.811  
Дисертацією є рукопис

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00754350 (0)

624  
Робота виконана у Харківському

університеті будівництва та архітектури

Науковий керівник: - кандидат технічних наук,

професор Фомін С. Л.

Офіційні опоненти :

1. доктор технічних наук, професор Жартовський В. М.

2. кандидат технічних наук, доцент Шмуклер В. С.

Провідна організація - УкрНДІПБ МВС України

Захист дисертації відбудеться "27" грудня 1998 р.

о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради

при Харківському державному технічному університеті

будівництва та архітектури за адресою: м. Харків.

вул. Сумська, 40

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці університету.

Автореферат розісланий "26" листопада 1998 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради,

кандидат технічних наук, доцент

Е. М. Кутовий.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми та ступінь її дослідженості. Одним з найважливіших завдань у будівництві є забезпечення необхідної межі вогнестійкості будівельних конструкцій.

Щороку в Україні трапляються понад 80 тисяч пожеж, 70 відсотків з яких перепадає на будови та споруди, які виконані з залізобетонних елементів. Але до цього часу робота залізобетонних конструкцій при різноманітних температурних режимах, в тому числі з урахуванням охолодження водяними струменями вивчена недостатньо.

Вплив високих температур та охолодження водяними струменями конструкцій призводить до зміни фізико-механічних властивостей бетону, напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій, накопичування пошкоджень, що значно знижує вогнестійкість будівельних конструкцій.

Існуюча методика розрахунку меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій не враховує наданих явищ і вимагає подальшого розвитку. Тому було проведено комплекс досліджень фізико-механічних властивостей бетону під впливом високих температур і охолодженні водою, характер розподілення зусиль у залізобетонних конструкціях, що виникають під дією температури та вологи такого типу та їх впливу на міцність, жорсткість та тріщиностійкість.

Обраний напрям досліджень відповідає задачам забезпечення пожежної безпеки об'єктів та переліку проблем науково-технічного розвитку державної пожежної охорони МВС України на період 1995-2000 р.р., а також планові Держбюджетної НДР України № 0028.

Метою роботи є розробка засобів оцінки вогнестійкості та остаточної міцності вигинаємих залізобетонних елементів

ЛНБ ім. В. Стефаніка

при різноманітних температурних режимах пожежі з урахуванням охолодження водяними струменями на основі вивчення впливу різноманітної тривалості нагріву та охолодження на поля температури, тиску, вологості, напруги, деформацій і сучасних методів розрахунку.

Об'єкт дослідження - вигинаємі залізобетонні елементи, їх робота при різних температурних режимах пожежі з обліком охолодження водяними струменями.

Задачі дослідження:

- розробити методика числового визначення полів надмірного тиску і вологості з обліком нелінійності теплофізичних характеристик та додаткового переносу вологи і тепла наявності фільтраційного руху пари та води, а також фазових перетворень;

- експериментально дослідити розподілення температури і вологості у залізобетонних елементах та виявити закономірності зміни вологи в залежності від температури при інтенсивному нагріві;

- розробити методика і провести дослідження повної діаграми деформування бетону при різних режимах його нагріву та охолодження;

- провести оцінку напружено-деформованого стану вигинаємих елементів з обліком залежностей деформативних та міцносних властивостей бетону при нагріві і послідуєчому охолодженні;

- провести експериментальне дослідження впливу інтенсивності нагріву та охолодження на напружено-деформований стан залізобетонних вигинаємих елементів;

- розробити методика оцінки вогнестійкості й остаточної міцності залізобетонних вигинаємих елементів при різноманіт-

них температурних режимах;

- впровадити результати дослідження у проектування й будівництво.

Методологія досліджень побудована на використанні числових методів рішення нелінійних диференціальних рівнянь теплопроводності з обліком фазових переходів, напружено-деформованого стану на всіх стадіях роботи вигинаємих залізобетонних конструкцій, експериментальному виявленні впливу нагріву й охолодження на міцносні і деформативні характеристики бетону, на основі яких розроблена методика розрахунку вогнестійкості і остаточної міцності, а також на її експериментальній перевірці і втіленні в практику.

Наукова новизна роботи:

- розроблена нова методика визначення нестационарних температурних полів з урахуванням мінливості характеристик теплопереносу і фазових перетворень на основі застосування консервативної кінцево - різницької схеми і засобу прямих, алгоритм і програма розрахунку на ІВМ РС/АТ;

- розроблена методика розрахунку поля надмірного тиску яка включає рішення рівняння Пуассона, що відшукується засобом циклічної редукції, а також поля вологості; програма на ІВМ РС/АТ у середовищі Турбо-паскаль;

- проведено числовий аналіз результатів розрахунку за розробленою методикою, що виявив істотні уточнення розрахункових полів температури, надмірного тиску та відносної вологості, встановлені особливості температурних полів при охолодженні поверхні різноманітної тривалості, а також з наступним нагрівом пожежним середовищем;

- розроблені засоби визначення температурних полів з допомогою аналогових упорядкувань при тривалому впливі по-

жемі з урахуванням мінливості коефіцієнтів теплопровідності від температури та з обліком переходу, експериментально виявлено нові закономірності розподілу температури та вологості у бетоні при нагріві й охолодженні за допомогою розробленої установки, одержано необхідні для рішення нелінійних диференціальних рівнянь залежності між відносною вологістю та температурою з урахуванням фазових перетворень:

- розроблена методика дослідження міцносних та деформативних характеристик бетону при інтенсивному високотемпературному нагріві, та нова важельна установка яка її реалізує, ( заявка на винахід №3102842 /28- 004332 з пріоритетом від 16.03.68 р. ); виявлені закономірності деформацій бетону при інтенсивному високотемпературному нагріві, а також при нагріві та наступному водяному охолодженні;

- проведено числове моделювання напружено-деформованого стану вигинаємих залізобетонних елементів з урахуванням впливу нагріву та охолодження на повну діаграму "σ-ε", виявлені нові закономірності їх роботи ;

- розроблена методика розрахунку вогнестійкості та остатньої міцності залізобетонних конструкцій;

- проведено експериментальні дослідження напружено-деформованого стану залізобетонних балок при дії нагріву та статичної навантаження, одержано нові дані про вплив нагріву та водяного охолодження на температурне зусилля, деформації, вогнестійкість та решту міцності.

#### Практична цінність та запровадження результатів роботи:

-розроблені рекомендації до розрахунку розподілу температури, тиску, вологості у елементах залізобетонних конструкцій, підвищують їх надійність в умовах пожежі, пропозиції з розрахунку меж вогнестійкості та остатньої міцності дозволя-

ють уточнити вплив температурного режиму на міцність та деформативність залізобетонних конструкцій, та дають можливість ефективно провести реконструкції та підсилення будов і споруд після пожежі;

- Результати проведених розробок втілено у проекти підсилення будівлі Красноградської дослідницької станції НВО "Дніпро", при оцінці несучої спроможності плит перекриття житлових будівель після пожежі у м. Харкові, у навчальний посібник для курсантів й слухачів, що навчаються за фахом " Пожежна безпека".

Достовірність результатів визначається використанням у проведених експериментальних дослідженнях достатньо точної виміральної апаратури, приборів, дослідницького обладнання; підтвердженням у експериментах справедливості прийнятих початкових передумов, допущень і характеру деформування зразків при нарузці, нагріві й охолодженні; задовільним збігом результату розрахунку міцності по розробленій методиці з експериментальними даними.

Особистий внесок дисертанта у одержання наукових результатів складається з:

- розроблено методику числового визначення температурних полів у залізобетонних конструкціях при короткочасному інтенсивному нагріванні та охолодженні, алгоритм та програма розрахунку температурного поля й поля вологості та результати їх числового моделювання;

- розроблена методика визначення температурних полів у залізобетонних елементах при тривалому впливі пожежі на електроінтеграторах прямої аналогії;

- розроблена методика експериментального дослідження полів температури й вологості при односторонньому нагріві й

оохолодженні, отримані результати експериментальних досліджень розподілу температури вологості при одномірному потоці тепла;

- розроблена методика дослідження міцності та деформативних характеристик бетону при дії температури та вологи та отримані результати експериментальних досліджень впливу нагріву та оохолодження на міцність і деформативність бетону;

- проведено числене моделювання напружено-деформованого стану вигинаємих залізобетонних елементів при інтенсивному нагріві та оохолодженні;

- експериментально досліджено вплив інтенсивного нагріву та оохолодження на напружено - деформований стан залізобетонних елементів;

- розроблена методика розрахунку вогнестійкості й остатньої міцності при різноманітних температурних режимах та оохолодженні водяними струменями;

- впроваджена розроблена методика у проектування й будівництво.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідалися на 48, 49 та 50 -ї науково - технічних конференціях викладачів Харківського інженерно-будівельного інституту за участю представників виробництв та профільних вузів м. Харків 1993, 1994, 1995 р.р., 1 та 2-ї Всеукраїнських науково-практичних конференціях "Проблеми пожежної безпеки" м. Харків 1993 р. м. Київ, 1995 р., На Міжнародній науково-практичній конференції "Удосконалення будівельних матеріалів, технологій та засобів розрахунку конструкцій у нових економічних умовах", м. Суми, 1994 р.

Публікації основні положення дисертації опубліковані у 10 печатних роботах.

Обсяг роботи. Дисертацію складають введення, шість розділів,

основні висновки, список використаної літератури з 115 найменувань. Вона містить 117 сторінок машинописного тексту, 40 малюнків, 23 таблиці.

### ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі викладені стислі відомості про стан та умови роботи залізобетонних конструкцій при інтенсивному нагрівові.

У дослідженнях В. Н. Агаджанова, Л. А. Аштона, Б. Бартолемі, Д. І. Бесі, В. В. Жукова, Н. А. Ільїна, Ж. Крїпа, Дж. Ленгдон-Томаса, Х. Л. Мальхотра, А. Ф. Мілованова, В. І. Мурашова, П. Х. Петерсена, В. А. Пчелинцева, М. Я. Ройтмана, І. Г. Романенкова, А. І. Сегалова, Траверса, Факлера, В. С. Федоренко, А. Н. Яковлева та ін. виявлено негативний вплив пожежі на залізобетонні конструкції у результаті розвитку в них полів температури, вологості та надмірного тиску. К. Лосьє описує випадок руйнування залізобетонних колон у момент їх охолодження водяними струменями.

Розрахунку температурно-вологісних полів у будівельних конструкціях присвячені роботи Ю. А. Олександрівського, А. В. Білова, В. Н. Богословського, П. Н. Васильєва, А. А. Гвоздєва, А. В. Ликова, Ш. Н. Плята, В. Г. Петрова-Денисова, В. І. Ройтмана, С. А. Фріда, К. Ф. Фокіна, С. Л. Фоміна, А. І. Яковлева та ін. Аналіз цих досліджень показує, що при інтенсивному нагрівові залізобетонних конструкцій пожежним середовищем найбільш істотними факторами теплового переносу є наявність випаровування вологи у бетоні, її фільтраційне перенесення у результаті градієнту надмірного тиску пари, істотні зміни характеристик від температури, у зв'язку з чим диференціальні рівняння тепловологопроводності становляться нелінійними і потребують підходів і засобів їх рішення (Л. А. Коздоба, Дж. Кранк, А. В. Ликов, Ю. М. Мацевітій, Н. Фрідман, П. Роуч, М. Рихтмайєр, А. А. Самарський,

А.Н.Тихонов, Р.Хокніс.

Впливу температурно - вологісних умов на міцність і деформативні характеристики бетону та арматури присвячені роботи Н.С.Бушуєва, Н.С.Бушева, В.І.Веретенникова, Н.І.Зенкова, А.П.Кричевського, А.Ф.Мілованова, К.Д.Некрасова, В.Г.Олімпієва, С.Л.Фоміна, А.І.Яковлева та ін.

Визначенню параметрів повної діаграми і методикам розрахунку при нормальній температурі присвячені роботи В.Н.Баякова, В.Я.Бачинського, А.Н.Бамбури, Ю.П.Гуці, А.Б.Голішева, С.В.Дмитрієва, А.П.Кричевського, А.Л.Леміша, Х.Роша, В.П.Чайки, Є.А.Чістякова та ін. Відсутні експериментальні дані про вплив нагріву та охолодження на повну діаграму "сігма-епсілон", облік якої, як показують обчислювання, дозволяє значно уточнити оцінку вогнестійкості та решту міцності конструкції.

У другому розділі розроблено методику визначення температурних полів при короткочасному інтенсивному нагріві, при нагріві та охолодженні водяними струменями, а також при тривалому нагріві з урахуванням мінливості теплофізичних характеристик бетону  $[\lambda(t), q_1(t)]$ , теплообміну з навколишнім середовищем  $[\alpha_{int}(t), \alpha_{ext}(t)]$  та фазових перетворень води  $[Q_2(t)]$ .

Рішення нестационарної задачі одержано з використанням розробленого В.М.Ройтманом прийому розподілення системи диференціальних рівнянь тепловологопереносу на самостійні рівняння шляхом введення експериментальної залежності між вологістю та температурою при фазових перетвореннях.

У зв'язку з нелінійністю диференціального рівняння теплопроводності воно перетворене так, що шуканими перемінними є консервативні величини - утримування тепла та температура:

$$\frac{\partial Q(t)}{\partial t} = \frac{1}{\gamma} \nabla [\lambda(t) \nabla t] \quad (1)$$

Утримування тепла  $Q(t)$  складається з тепла, що акумулювалося  $Q_1(t)$ , теплоти фазових перетворень  $Q_2(t)$ .

Рівняння (1) відбиває суттєвість фізичного закону збереження енергії і дозволяє зберегти інтегральні характеристики переносу у кінцево-різносній схемі, що істотно підвищує точність рішення.

Розв'язання проведено засобом прямих шляхом дискретизації першим правої частини рівняння (1), перетворюючи його у систему звичайних диференціальних рівнянь, для вулових значень в наступним її розв'язанням двоетапним засобом у варіанті предиктор - коректор. Розроблена програма розрахунку "Pogor" на IBM PC/AT у середовищі Turbo Pascal. Програма функціонує під управлінням інтерактивної оболонки, що дозволяє у ході сеансу рішення контролювати обчислювальний процес на екрані монітору. У випадку прояви нестійкості, що виражається у появі піків на температурній кривій, оператор ЕОМ змінює крок інтегрування за часом і повторює обчислювання.

Для визначення полів надмірного тиску  $P(x, y)$ , рівняння паропроводності також подається у консервативній формі:

$$\frac{\partial G}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \nabla [ \lambda_r \nabla r ] \quad (2)$$

Ліва частина рівняння (2) становить видаток утримування пари у одиницю часу

$$\frac{\partial G}{\partial \tau} = C_p \frac{\partial P}{\partial \tau} + \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (3)$$

Таким чином рішення рівняння (2) можна отримати за відомими з рішення рівняння теплопроводності (1) швидкістю зміни температури у елементарному об'ємі  $\frac{\partial t}{\partial \tau}$  та швидкістю зміни вологості від температури при фазових перетвореннях  $Wt$ . Враховуючи, що кількість акумульованої бетоном пари дуже мала у порівнянні з кількістю пари, що переміщується філь-

траційними струменями, а також постійність коефіцієнту теплопроводності бетону, рівняння (2) спрощується:

$$q(x, \tau) = \frac{\partial W}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial \tau} \frac{\gamma}{\lambda_p} = \nabla^2 p \quad (4)$$

Розроблена методика рішення рівняння Пуассона (4) із застосуванням одного з сучасних швидких засобів рішення еліптичних рівнянь - засобу циклічної редукції та формування лівої частини рівняння (4) - функції джерел  $q(x, \tau)$  з застосуванням табличного процесора Super-Calc 4. Розроблена програма "Poisson" для IBM PC/AT.

Розподіл вологості визначається з рівняння

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = q(x, \tau) \frac{\lambda_p}{\gamma} = M(x, \tau) \quad (5)$$

Використовуючи кінцево - різне уявлення рівняння (5) отримуємо рекурентні формули для визначення вологості у  $i$ -й точці простору в  $j+1$  момент часу за відомим значенням вологості у цій же точці у попередньому тимчасовому шарі  $j$ :

$$W_{i,j+1} = M(i,j)\Delta\tau + W_{i,j} \quad (6)$$

Розв'язання проводиться з застосуванням Super-Calc 4.

Проведений чисельний аналіз результатів розрахунків за розробленою методикою виявив істотні уточнення розрахункових полів температури, надмірного тиску та відносної вологості. Зіставлення температурних полів у плиті (рис.1) з урахуванням фазових перетворень показує, що криві зміни температури по запропонованій методиці запізнюється порівняно з розрахунком за існуючою методикою. Це спізнання пов'язане зі стабілізацією температури (горизонтальні ділянки кривих) у зоні випаровування. Одержане рішення наочно демонструє фізичний процес випаровування, фільтрації водяної пари і її конденсацію. Швидкість нагріву поверхностей також знижується, характер розподілу температури за товщиною відрізняється від роз-

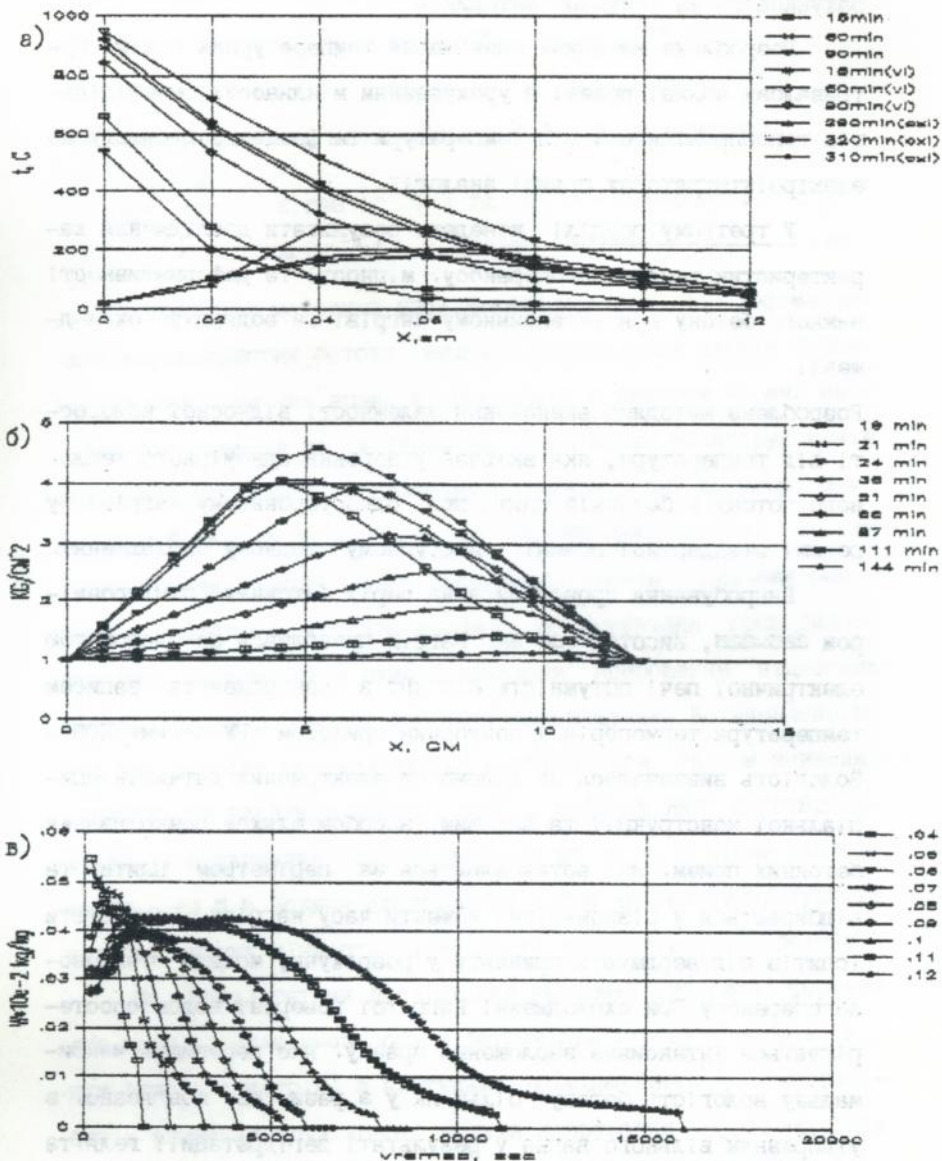


Рис.І. Розподіл температури - а) (з обліком вологи (vl) та з обліком охолодження (oxl), тиску - б), вологи - в) у перетині бетонної плити.

рахункового за існуючою методикою.

Розроблена методика визначення температурних полів при тривалому впливі пожежі з урахуванням мінливості коефіцієнтів теплопровідності від температури та фазового переходу на електроінтеграторах прямої аналогії.

У третьому розділі наведено результати дослідження характеристик тепловологопереносу, міцності та деформативності важкого бетону при інтенсивному нагріві та водному охолодженні.

Розроблена методика визначення залежності відносної вологості від температури, яка включає утворення одномірного теплового потоку у бетонній плиті при односторонньому нагріві у режимі стандартної пожежі і наступному водному охолодженні.

Випробування проводилися на серії бетонних плит розміром  $225 \times 225$ , висотою 120 мм. Нагрів проводився за допомогою електричної печі потужністю 2,5 кВт з контролем та записом температури термодарів і повторним приладом РУ 5-01м. КСП-а Вологість визначалася за допомогою електричних датчиків спеціальної конструкції та ваговим засобом шляхом розколювання бетонних призм, які встановлюються за периметром плити та відбирається у різноманітні моменти часу нагріву. Результати іспитів підтверджують прийняту у розрахунку модель тепловологопереносу. При охолодженні нагрітої поверхні водою спостерігається інтенсивне зволоження зразку, яке перевищує максимальну вологість бетону більш як у 3 рази, що пов'язано, з утворенням вільного вапна у результаті дегідратації геля та підвищеною гігроскопічністю.

Залежності між відносною вологістю  $W$  та температурою  $t$  встановлено у результаті аналізу температурних та вологісних полів. Її апроксимація проведена з використанням програмного

пакету " Numeri " на IBM PC/AT наступною емпіричною формулою:

$$W = 2.96766 \cdot 10^{-2} - 2.696 \cdot 10^{-4}t + 2.35 \cdot 10^{-5}t^2 - 3.62025 \cdot 10^{-7}t^3 + 1.92626 \cdot 10^{-9}t^4 - 3.44553 \cdot 10^{-12}t^5 \quad (7)$$

Характеристика інтенсивності фазових перетворень:

$$B_t = \frac{\partial W}{\partial t} = -2.696 \cdot 10^{-4} + 4.72 \cdot 10^{-5}t - 1.086075 \cdot 10^{-6}t^2 + 7.70504 \cdot 10^{-8}t^3 - 1.722365 \cdot 10^{-11}t^4 \quad (8)$$

Розроблена методика дослідження міцності та деформативних характеристик бетону, включає рівномірний нагрів порожнистих циліндричних зразків зовнішнім діаметром 70 мм, наступне охолодження та їх іспит на спеціально сконструйованій важільній установці, що дозволяє одержати повну діаграму "σ-ε". Вимір деформацій проводився екстензометрами на базі 100 мм індикаторами годинникового типу, вимір зусиль - силувимірвачами з жорсткою характеристикою. Загружування проводилося етапами, на кожному з яких задавалося прирощення відносних деформацій за допомогою дозатору переміщувачів. Встановлено, що під час нагріву та охолодженні відбувається значне зниження міцності, за винятком області 200°C, поблизу якої спостерігається її підвищення під час нагріву на 30 %, а після охолодження - на 5 %. Водяне охолодження після високотемпературного нагріву знижує міцність та збільшує деформативність бетону.

За результатами дослідження виведені емпіричні формули для коефіцієнтів умов роботи бетону при стиску і нагріві  $\gamma_{bt}$ , при стиску і нагріві з наступним охолодженням  $\gamma_{bt,c}$ , коефіцієнтів зниження початкового модуля напруження  $\beta_{bt}$  та  $\beta_{bt,c}$  при нагріві, нагріві та охолодженні відповідно, те ж для зниження граничного модуля деформації  $\beta_{bt,d}$  і  $\beta_{bt,c,d}$ , коефіцієнтів збільшення граничного стискування при нагріві  $K_{bt}$  та при нагріві і охолодженні  $K_{bt,c}$ :

$$\gamma = 1.003 + 4 \cdot 10^{-4}t - 2.4 \cdot 10^{-6}t^2 + 1.35 \cdot 10^{-9}t^3 \quad (9)$$

$$\gamma_{btc} = 1.008 - 1 \cdot 10^{-9}t + 2.14 \cdot 10^{-7}t^2 + 1.04 \cdot 10^{-10}t^3 \quad (10)$$

$$\beta = 1.009 - 1.5 \cdot 10^{-9}t - 4.67 \cdot 10^{-7}t^2 + 1.01 \cdot 10^{-9}t^3 \quad (11)$$

$$\beta_{btu} = 1.01 + 6.8 \cdot 10^{-6}t - 3.5 \cdot 10^{-6}t^2 + 2.6 \cdot 10^{-9}t^3 \quad (12)$$

$$K_{bt} = 0.72 + 1 \cdot 10^{-9}t + 6.2 \cdot 10^{-6}t^2 \quad (13)$$

$$\beta_{btc} = 0.995 - 2 \cdot 10^{-9}t + 9.3 \cdot 10^{-7}t^2 + 1.83 \cdot 10^{-10}t^3 \quad (14)$$

$$\beta_{btuc} = 1.02 - 1.3 \cdot 10^{-9}t - 1.09 \cdot 10^{-6}t^2 + 1.4 \cdot 10^{-9}t^3 \quad (15)$$

$$K_{btc} = 0.93 - 3.47 \cdot 10^{-4}t + 7.1 \cdot 10^{-6}t^2 \quad (16)$$

При температурі 20 °С міцність на стискування дорівнює  $R_b = 33,504$  МПа, початковий модуль пружності  $E_b = 2,613 \cdot 10^4$  МПа, граничний модуль деформації  $E_{bu} = 1,76 \cdot 10^4$  МПа, гранична стискуваність  $\epsilon_R = 190 \cdot 10^{-5}$ .

У четвертому розділі проведено оцінку напружено-деформованого стану залізобетонних вигинаємих елементів при різних температурних режимах у результаті обчислювального експерименту. Враховуючи істотну фізичну нелінійність деформування бетону та значний вплив температури нагріву, а також нагріву та охолодження, застосована нелінійна математична модель. Для реалізації математичної апроксимації, числового алгоритму, програми моделювання і процесу обчислення застосований програмний комплекс "Міраж", розроблений НДІАСС України, у складі якого існує шаговий процесор Мир -1 -3 призначений для розв'язання нелінійних задач будівельної механіки засобом кінцевих елементів у переміщеннях. Реалізація фізичної нелінійності бетону та арматури досягається за рахунок розвитку бібліотеки законів деформування матеріалів (залежності напруги-деформації), що отримані експериментально (розділ 3).

Розглянута залізобетонна балочна плита розмірами 1200 x

1200, висотою перетину 120 мм. армована 11  $\emptyset$  10 А-III та балка довжиною 2700 мм розмірами у поперечному перетині 220x120 мм, армована 6  $\emptyset$  10 А-III. Розрахункова модель плити складена плоскими кінцевими елементами: по висоті перетину плита розподілена на 10 бетонних та 1 арматурний елемент, по довжині на - 11 частин.

Напружено-деформований стан визначався для різноманітних етапів пожежі: 1) у процесі нагріву; 2) у процесі охолодження після нагріву; 3) у холодному стані до нагріву, після нагріву та після нагріву й охолодження водяними струменями. Алгоритм розв'язання передбачає процедуру виключення матеріалу елементарної площі з роботи перетину при досягненні узагальненої деформації граничного стану  $\epsilon_{Rt}(\epsilon_{Rtt})$ , що дозволяє відстежити зміни міцності у процесі вогневого впливу пожежного середовища для визначення вогнестійкості конструкції.

Внаслідок чисельного експерименту виявлено закономірності зниження міцності вигинаних елементів при нагріві з боку стислої зони та при наступному водяному охолодженні. Одержано, що вогнестійкість плити при наступному охолодженні знижується.

Розроблено рекомендації до визначення вогнестійкості остаточної міцності при різноманітних температурних режимах пожежі, які містять основні теоретичні положення та практичні запропонування по розрахунку меж вогнестійкості вигинаних залізобетонних конструкцій.

У п'ятому розділі викладено результати експериментального дослідження впливу інтенсивного нагріву та водяного охолодження на міцність та жорсткість залізобетонних плит брусків. Залізобетонні плити розміром 1200x1200x120 мм вста-

ДНЕ І. В. Стефанік  
АН України

новлювали над вогневою камерою електричної печі на дві опори, нагрівали зі сторони стислої води. Під час нагріву фіксували розподіл температури за товщиною перетину терморезисторами та температурні деформації прогибовимірниками з ціною поділки 0,01 мм. Іспити статичним навантаженням проводили у холодному стані. Випробували з плити : 1) у холодному стані до нагріву, 2) після нагріву, 3) після водяного охолодження нагрітої поверхні.

Одержано, що саме більше зниження міцності плит діється після їх нагріву і охолодження водяними струменями.

Під час іспиту брусків досліджувалась динаміка виникнення, розвитку та релаксації температурних моментів при нагріві середньої частини балки у вогневій камері та штучному вирівнюванню осі вигину шляхом додатка зусиль до її кінців. Температурні деформації замірялися прогибовимірниками, температурний момент обчислювався по реакції опір. Випробувано три балки : 1- у холодному стані, 2- при нагріві і затриманих деформаціях, 3- при водяному охолодженні нагрітої поверхні.

Виявлені закономірності вільних деформацій, температурного моменту та міцності при рівномірних режимах іспиту.

Розрахункові значення міцності по розробленій методиці мають задовільний збіг з результатами іспитів.

Шостий розділ присвячений впровадженню результатів у проекти підсилення будівельних конструкцій після пожежі, у методичні рекомендації до розрахунку вогневостійкості залізобетонних конструкцій і тактиці гасіння пожеж.

Розроблені засоби розрахунку температурних полів при короткочасному і тривалому температурному впливові, а також засоби оцінки остаточної міцності впровадженні у проектуванні підсилення і відбудови залізобетонних конструкцій споруди

сушильного відділення комплексу обробки батьківських форм насіння кукурудзи Красноградської дослідної станції НВО "Дніпро" та житлових будов залужинського житлового масиву м. Харкова.

Розроблені методичні рекомендації по розрахунку меж вогнестійкості вигинаємих залізобетонних конструкцій і рекомендації по тактиці гасіння пожеж, які включають методики розрахунку вогнестійкості при інтенсивному нагріві, нагріві та охолодженні по довільному температурному режимові, впливу режиму "стандартної пожежі". Рекомендації використовуються як у навчальному процесі, так і при проектуванні, будівництві та гасінні пожеж.

#### ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Виявлено, що розподіл температури у залізобетонних конструкціях істотно залежить від температурного режиму пожежного середовища. При короткочасному інтенсивному нагріві та при нагріві і водяному охолодженні необхідний облік додаткового переносу вологи і тепла зважаючи на наявність фільтраційного руху пара й рідини, при тривалому високотемпературному нагріві необхідний облік мінливості теплофізичних характеристик у залежності від температури і вологості.

а. Розроблена методика чисельного рішення системи нелінійних диференціальних рівнянь тепловологопереносу, що описує процеси розподілу тепла, вологості та надмірного тиску у результаті інтенсивного її випаровування. У зв'язку з істотною нелінійністю теплофізичних характеристик для рішення диференціального рівняння теплопроводності застосована консервативна кінцево - різницька схема, що підвищує точність рішення. Рішення проведено засобом прямих та двоетапним засобом у варіанті предиктор-коректор. (програма "Терма" на ІВМ РС-АТ).

3. Розроблена методика розрахунку поля надмірного тиску, що зводиться до рішення рівняння Пуассона, яке відшукується засобом циклічної редукції, що є одним з найбільш швидких засобів рішення еліптичних диференціальних рівнянь. (програма " Poisson " на IBM PC/AT).

4. Проведений чисельний аналіз результатів розрахунку за розробленою методикою, що виявив істотні уточнення розрахункових полів температури, надмірного тиску та відносної вологості. Встановлено особливості температурних полів при охолодженні поверхні різноманітної тривалості, а також при наступному нагрівові пожежним середовищем.

5. Розроблені засоби визначення температурних полів при тривалому впливові пожежі з урахуванням мінливості коефіцієнтів теплопровідності від температури та фазового переходу на електронітеграторах прямої аналогії.

6. Розроблений прилад для експериментального визначення одновірних полів температури і вологості у бетоні при односторонньому інтенсивному нагрівові, у тому числі по режимові стандартної пожежі. Проведені експериментальні дослідження, виявлені нові закономірності полів, що вивчаються. Отримані залежності між відносною вологістю  $W$  і температурою  $t$ .

7. Розроблена методика дослідження міцносних та деформативних характеристик бетону при високотемпературному інтенсивному нагрівові. Розроблено, виготовлено і випробувано новий рычажний прилад для іспиту міцносних і деформативних характеристик бетону при високотемпературному нагрівові, що дозволяє проводити іспити у різноманітних режимах, в тому числі у релаксаційному та можливість отримати повну діаграму " напруга - деформація ".

8. Експериментально виявлені закономірності деформування

бетону при інтенсивному високотемпературному нагрівові, а також при нагрівові та наступному водяному охолодженні. Встановлено, що водяне охолодження після високотемпературного нагріву знижує міцність та збільшує деформативність бетону.

Запропонований пакет емпіричних формул для опису міцносних та деформативних характеристик важкого бетону при нагрівові та охолодженні.

9. Проведено чисельне моделювання напружено - деформованого стану вигинаємих залізобетонних конструкцій з використанням програмного пакету "Міраж" з урахуванням нелінійного деформування бетону і арматури, а також впливу нагріву та охолодження на повну діаграму " $\sigma$ - $\epsilon$ " бетону. Результат моделювання дозволив розробити методику до розрахунку меж вогнестійкості вигинаємих залізобетонних конструкцій при нагрівові і охолодженні, а також визначити остатню міцність конструкції залежно від температурного режиму.

Експериментальні дослідження впливу нагріву на міцність і жорсткість плит та балок підтверджують вірогідність розробленої методики.

10. Результати проведених досліджень впроваджені у проекти підсилення та відбудови залізобетонних конструкцій будов, а також у методичні рекомендації розрахунку меж вогнестійкості вигинаємих залізобетонних конструкцій і рекомендації по тактиці гасіння пожеж.

Результати дисертації опубліковані у 10 роботах основними з яких є:

1. Кулешов Н.Н., Фомин С.Л. Методика исследований железобетонных конструкций при воздействии пожара и резкого охлаждения в процессе тушения водой // Тезисы докладов 48-й научно-технической конференции "Повышение эффективности строительства": ХИСИ. Харьков: 1993 г. - с. 55

2. Фомин С.Л., Кулешов Н.Н., Влияние стандартного пожара и охлаждения водяными струями на полную диаграмму

напряжения-деформации бетона. //Материалы Международной научно-практической конференции "Совершенствование строительных материалов, технологии и методов расчета конструкций в новых экономических условиях. Сумы: ИПШ "Мрия" ЛТД, 1994 г. - с. 252.

3. Фомин С. Д., Кулешов Н. Н., Стельмах О. А. Расчет огнестойкости конструкций с учетом полной диаграммы ( $\sigma - \epsilon$ ). // Тезисы докладов 2-й Всеукраинской научно-практической конференции "Проблемы пожарной безопасности". Киев: 1993. - с. 33а.

Кулешов Николай Николаевич. Напряженно-деформированное состояние железобетонных изгибаемых элементов при различных температурных режимах пожара с учетом охлаждения водяными струями. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.26.02 - пожарная безопасность и 05.23.01 - строительные конструкции, здания и сооружения, Харьковский государственный технический университет строительства и архитектуры, Харьков, 1995.

Защищается рукопись, содержащая теоретические и экспериментальные исследования влияния температурно - влажностного режима пожарной среды на напряженно - деформированное состояние железобетонных конструкций. Разработаны методы оценки огнестойкости и остаточной прочности изгибаемых железобетонных элементов при различных температурных режимах пожара с учетом охлаждения водяными струями на основе изучения влияния различной продолжительности нагрева и охлаждения на поля температуры и влажности, напряжения, деформации и современных методов расчета. Разработаны предложения по экспериментальному определению полей температур и влажности при интенсивном нагреве, предложения по экспериментальному определению прочностных и деформативных характеристик бетона, включая полную диаграмму " $\sigma - \epsilon$ ", методика определения температурных усилий. Результаты внедрены в проекты усиления зданий и сооружений, а также в учебное пособие для курсантов и слушателей, обучающихся по специальности "Пожарная безопасность".

Kuleshov N. N. Stressed - deformative state of ferro-concrete bent structure in different thermal conditions of fire allowing for water jet's cooling.

The dissertation for a master of technical science of the speciality 05.26.02 - Fire Safety and 05.23.01 Building structures, edifices and buildings, Kharkov State technical university of building and architecture. Kharkov, 1995.

Submitted thesis contains theoretical and practical re-

search of the influence of thermal - moist regime in fire condition for stressed - deformative state of fireproof and remaining strength's estimation in different thermal fire conditions allowing for water jet's cooling have been worked out in terms of study of different heating and cooling duration influence for thermal field, pressure, moisture, stress, deformation, and up-to-date methods of analysis. The offers for experimental determination of durable and deformative concrete characteristic including complete diagram "G - e", the technique thermal force definition have been worked out also. The results are introduced into the projects of buildings and edifices' reinforcement and also into the text - books for cadets and students at a military academy, studying by the speciality "Fire Safety".

Ключові слова: Температурно - вологісні поля, пожевне середовище, напруження, деформація, температурні зусилля, вогнестійкість.

---

Підписано до друку 23.ІІ.95 Друк.арк І,Б. Тир.100  
Обл.вид.арк.І,З. Формат папіру 60x84/16 Зам.І/28-95

---

