

*М.М. Семерак, д-р техн. наук, професор, А.М. Домінік, В.М. Байтала, В.В. Чернецький
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

ВОГНЕСТІЙКІСТЬ БЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ

Досліджено напружено-деформований стан несучої бетонної конструкції циліндричної форми за умов пожежі. Запропонована методика визначення та дослідження температурного поля в конструкції, зумовленого різкою зміною температури зовнішнього середовища. Теплообмін між конструкцією та середовищем відбувається за законом Ньютона. Визначено та досліджено напружено-деформований стан конструкції обумовлений температурою. На основі проведених досліджень запропонована методика визначення границі вогнестійкості циліндричної колони за ознакою втрати несучої здатності, втрати цілісності та теплоізоляційної здатності. Результати досліджень зображені графічно.

Ключові слова: вогнестійкість бетонних конструкцій, температурне поле, переміщення, термонапружений стан.

Сучасний стан. Матеріальні втрати на пожежах в основному зумовлені руйнуванням конструкцій будівель і споруд. Конструкції житлових будинків, виробничих цехів, гідротехнічних, нафтодобувних підземних споруд в основному виготовляються з бетону і залізобетону. Ці будівельні матеріали відповідають таким вимогам, як міцність, жорсткість, довговічність можливість надати конструкції складної форми. Але через різні обставини в будівлях і спорудах виникають пожежі. Основним руйнівним фактором, що діє на конструкцію за умов пожежі, є величина температури і її градієнт [1,2].

При пожежах в житлових і адміністративних будівлях температура в приміщенні сягає 1100 °С. В промислових і складських приміщеннях при горінні рідин і пінопластів температура піднімається до 1200 °С. Температура горіння скраплених газів дорівнює 1600 °С, а газоподібного водню – понад 2000 °С. В початковій стадії пожежі нагріваються поверхні конструкцій. Інтенсивність прогріву конструкцій і величина градієнта температури по її товщині залежать від багатьох факторів: величини температури продуктів горіння, умов теплообміну між поверхнею конструкції і зовнішнім середовищем, теплофізичних характеристик матеріалів, з яких виготовлена конструкція, часу прогріву та ін.

Як відомо за границю вогнестійкості будівельних конструкцій приймається час їх нагріву при стандартних випробуваннях до виникнення одного із трьох граничних станів вогнестійкості [3]:

- за ознакою втрати несучої здатності;
- за ознакою втрати цілісності;
- за ознакою втрати теплоізолюючої здатності.

При оцінці несучої здатності конструкції за умов пожежі необхідно враховувати термонапружений стан конструкції зумовлений зміною температури, величиною температурного градієнта і часом нагріву.

Температурні напруження, які виникають в конструкціях, можна вивчати незалежно від механічних напружень, оскільки внаслідок лінійності рівнянь термопружності повні величини напружень одержують шляхом додавання температурних і механічних напружень.

В початковій стадії нагріву бетону проходить випаровування хімічно незв'язаної води, що навіть дещо підвищує його міцність. При 250-350 °С спостерігається утворення тріщин від температурного ущільнення бетону, при 350-450 °С утворюються тріщини від різних температурних деформацій цементного каменю. Іншим суттєвим фактором збереження несучої здатності бетону є виключення вибухоподібної втрати цілісності (крихкого руйнування бетону). Її зовнішній прояв полягає в тому, що під час пожежі через 6-10 хв після початку вогняної дії

майже безперервно від обігрівуючої поверхні бетонних конструкцій відколюються пластинки матеріалу площею 0,04-0,05 м² і товщиною 0,005-0,015м. Куски поверхневого шару бетону відлітають при цьому на віддаль 10-15м. В результаті конструкція втрачає несучу здатність, що може спричинити руйнування всієї будівлі. Вибухоподібна втрата цілісності зумовлюється підвищеною вологістю бетону (важкий бетон – більше 3,5%, легкий – 5%) або є наслідком переходу уже існуючих перед нагріванням тріщин в структурі бетону із рівноважного стану в нерівноважний і спонтанний їх розвиток під дією температурних напружень [4].

Для дослідження вищезгаданих станів втрати вогнестійкості бетонної конструкції за умов пожежі розглянемо конкретну задачу.

Розглянемо бетонну конструкцію циліндричної форми радіусом R , яка нагріта до постійної температури t_0 . В початковий момент часу циліндр поміщається в середовище з постійною температурою $t_c > t_0$, яка підтримується постійною протягом всього процесу нагрівання. Диференціальне рівняння теплопровідності запишемо таким чином:

$$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right) \quad (1)$$

Початкові і граничні умови запишемо у вигляді:

$$t(r, 0) = t_0, \quad 0 < r < R, \quad (2)$$

$$-\frac{\partial t(R, \tau)}{\partial r} + \frac{\alpha}{\lambda} (t_c - t(R, \tau)) = 0, \quad (3)$$

$$0 < r < R$$

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial r} = 0, \quad t(0, \tau) \neq \infty, \quad (4)$$

де $t(r, \tau)$ – температура в конструкції ⁰С; t_c - значення температури середовища, ⁰С;

$a = \frac{\lambda}{c_v \cdot \rho}$ – коефіцієнт температуропровідності, $\frac{M^2}{c}$; λ – коефіцієнт теплопровідності,

$\frac{Вт}{м \cdot К}$; c_v – питома ізохорна теплоємність, $\frac{Дж}{кг \cdot К}$; ρ – густина тіла, $\frac{кг}{м^3}$.

Застосувавши до рівняння (1) і умов (2-4) перетворення Лапласа, одержимо [5]:

$$\Theta = \frac{t(r, \tau) - t_0}{t_c - t_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n J_0(\mu_n \frac{r}{R}) \exp(-\mu_n Fo) \quad (5)$$

де A_n – сталі коефіцієнти (так звані початкові теплові амплітуди), що знаходяться із виразу

$A_n = \frac{2J_1(\mu_n)}{\mu_n (J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n))}$; μ_n – характеристичні числа знаходяться із виразу $\frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} = \frac{1}{Bi} \mu$;

Bi - критерій Біо, $Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda}$; $Fo = \frac{a \cdot \tau}{R^2}$ – критерій Фур'є; α - коефіцієнт теплообміну,

$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$; R - радіус конструкції, м.

За формулою (5) проведено розрахунки температури в бетонній конструкції радіусом $R = 0,4$ при температурі t_c рівній 300, 500 та 800 ⁰С. При розрахунках прийнято, що

$\alpha = 6 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$. Результати зображені графічно на рис. 1.

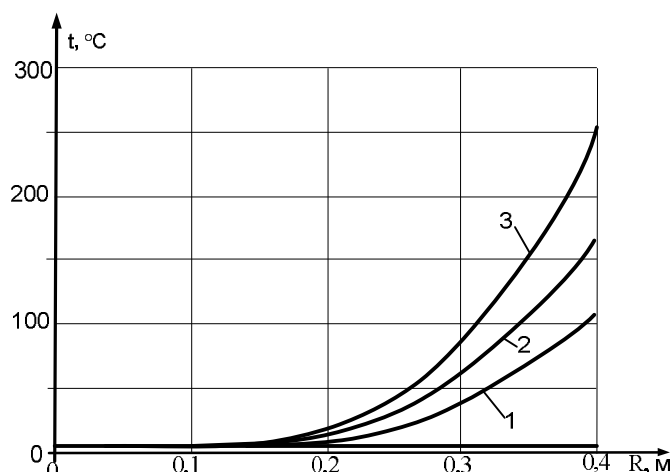


Рис.1. Розподіл температури по товщині циліндричної конструкції за $\tau = 30$ хв
1 – температура середовища 300°C ; 2 – 500°C ; 3 – 800°C .

Аналіз графіків показує, що за час 30 хв конструкція прогрівється до половини радіуса. При збільшенні температури середовища нагрів бокової поверхні конструкції теж збільшується.

З метою дослідження впливу цих параметрів на напружено-деформований стан розглянемо циліндр, торці якого защемлені, тобто осьове відносне видовження $\varepsilon_z = 0$. Радіальне переміщення U точок поперечного перерізу можна знайти, розв'язавши диференціальне рівняння [6]:

$$\frac{d^2U}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU}{dr} - \frac{U}{r^2} = \frac{1+\nu}{1-\nu} \cdot \alpha_t \cdot \frac{dt}{dr}, \quad (6)$$

де U – переміщення, м; ν – коефіцієнт Пуассона; α_t – температурний коефіцієнт лінійного розширення, K^{-1} .

Проінтегрувавши рівняння (6) одержимо:

$$U = A \cdot r + \frac{B}{r} + \frac{1+\nu}{1-\nu} \cdot \alpha_t \cdot \frac{1}{r} \cdot \int_0^r t \cdot r dr, \quad (7)$$

де A, B – сталі інтегрування, які знаходимо із граничних умов.

Напруження, що діють в радіальному (σ_r), кільцевому (σ_φ) та осьовому (σ_z) напрямках запишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= -\frac{\alpha_t \cdot E}{1-\nu} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \int_0^r t(r) \cdot r dr + \frac{E}{1+\nu} \cdot \left[\frac{A}{1-2\nu} - \frac{B}{r^2} \right], \\ \sigma_\varphi &= \frac{\alpha_t \cdot E}{1-\nu} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \int_0^r t(r) \cdot r dr + \frac{E}{1+\nu} \cdot \left[\frac{A}{1-2\nu} + \frac{B}{r^2} \right] - \frac{\alpha_t \cdot E \cdot t(r)}{1-\nu}, \\ \sigma_z &= A \frac{2E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} - \frac{E \alpha_t t(r)}{(1-\nu)}, \end{aligned} \quad (8)$$

де E – модуль Юнга, Па; α_t – температурний коефіцієнт лінійного розширення для заданого матеріалу, $1/\text{K}$.

Постійні інтегрування A і B знайдемо з відсутності переміщень (7) при $r = 0$, а також рівності нулю радіальних напружень при $r = R$.

$$\text{Тобто} \quad U = 0, \quad \text{при} \quad r = 0, \quad (9)$$

$\sigma_r = 0$ при $r = R$.

Відносні видовження в напрямку паралельному вісі циліндра рівні нулю з умови початкового навантаження колони.

Підставивши вирази (7) і перший вираз (8) в умови (9) одержимо систему з двох алгебраїчних рівнянь для знаходження двох невідомих A, B . Підставивши значення фізико-механічних характеристик бетону: $c_v = 840$, $\lambda = 1,15$, $\rho = 2200$, $E = 0,23 \cdot 10^{11}$, $\alpha_t = 1,2 \cdot 10^{-5}$, $\nu = 0,16$ знайдено переміщення і напруження. Отримані результати зобразимо графічно на рис 2-5.

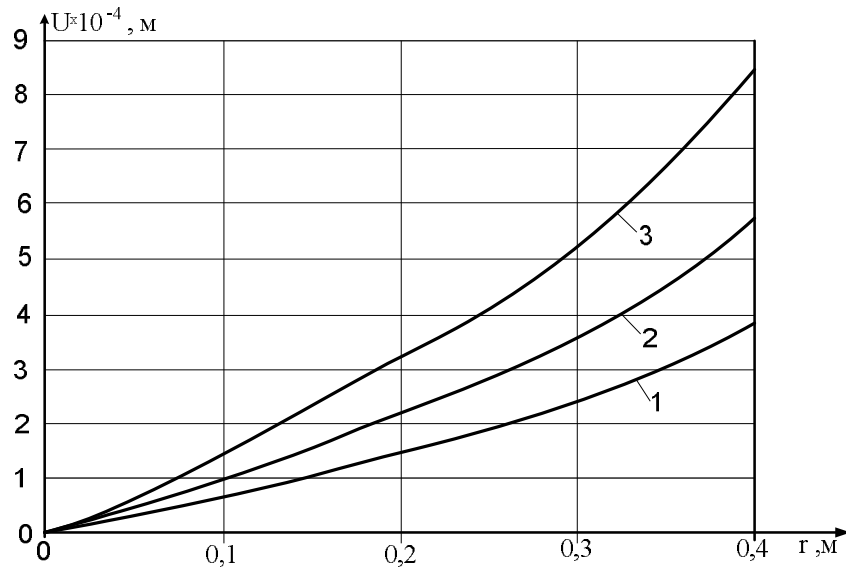


Рис. 2. Температурні переміщення вздовж радіуса
1 – переміщення при температурі середовища 300°C ; 2 – 500°C ; 3 – 800°C .

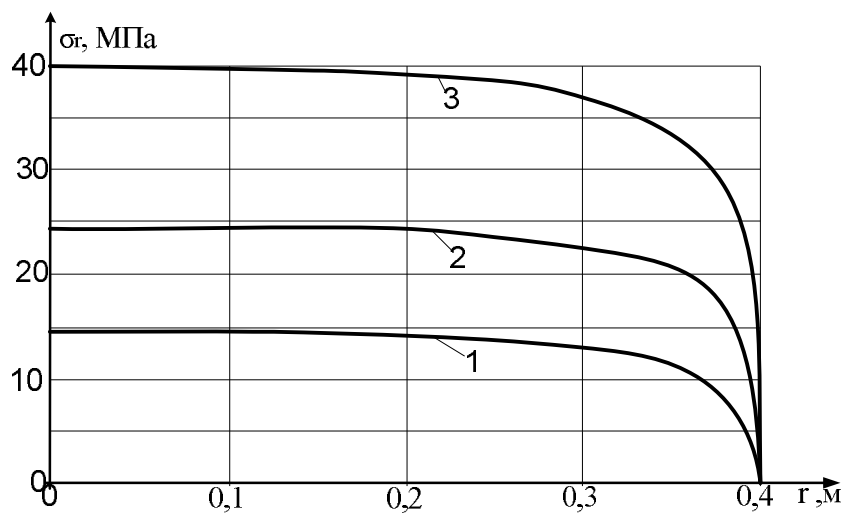


Рис.3. Зміна температурних радіальних напружень вздовж радіуса
1 – напруження при температурі середовища 300°C ; 2 – 500°C ; 3 – 800°C .

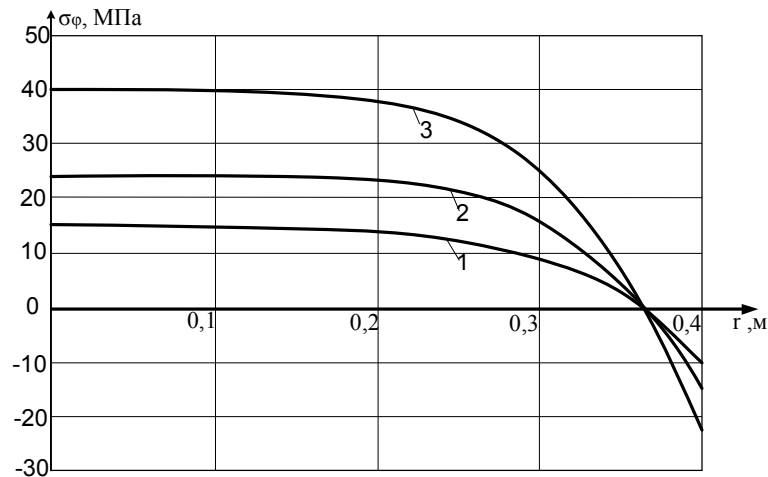


Рис.4. Зміна кільцевих температурних напружень вздовж радіуса
1 – напруження при температурі середовища 300 °С; 2 – 500 °С; 3 – 800 °С.

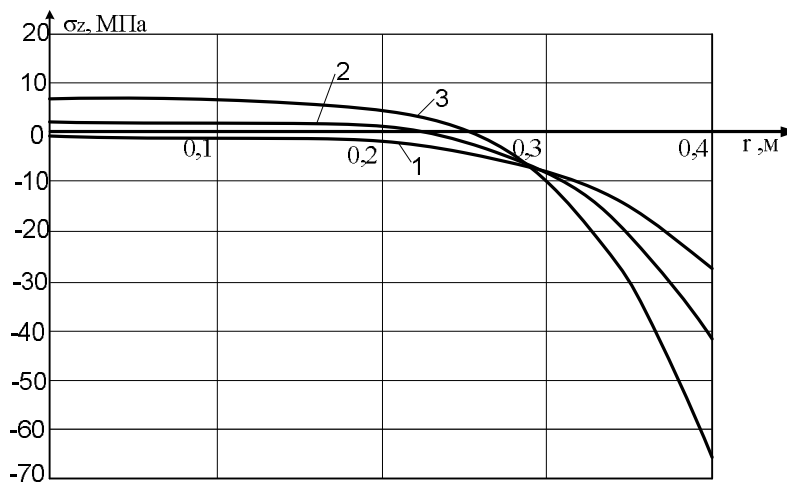


Рис.5. Зміна осьових температурних напружень вздовж радіуса
1 – напруження при температурі середовища 300 °С; 2 – 500 °С; 3 – 800 °С.

З аналізу одержаних результатів бачимо, що температурні переміщення (рис.2) в центрі циліндричної конструкції рівні нулю, а на боковій поверхні вони приймають найбільше значення. При збільшенні температури вони зростають.

Радіальні і кільцеві температурні напруження (рис. 3,4) найбільші значення приймають в центрі поперечного перерізу і є напруженнями розтягу. Кільцеві напруження в при поверхневих шарах є стискаючими. Осьові напруження є стискаючими напруженнями і найбільше значення досягають на боковій поверхні ($r = R$).

Запропонована модель дослідження наружено-деформованого стану дозволяє дослідити температурні напруження і переміщення в залежності від координат і часу.

Висновки:

1. За час рівний 30 хв поверхня конструкції нагрівається до температури майже 250 °С. При такій температурі переміщення при поверхневих шарів є найбільшими, а радіальні температурні напруження є розтягуючи ми. При таких умовах можуть виникнути тріщини, які можуть привести до відколювання поверхневих шарів, що часто зустрічається в практиці.

2. Аналіз напружено-деформованого стану бетонних конструкцій показують, що при дослідженні їх вогнестійкості необхідно враховувати температурні напруження і переміщення.

Список літератури:

1. Коляно Ю. М. Термомеханика: Библиографический указатель отечественной и иностранной литературы за 1965-1976гг. / Ю. М. Коляно, М. М. Семерак, О. Я. Яворская. – Львов: изд-во Львовская научная библиотека им. В. Стефаника АН УССР, 1979. Ч I, II. – Кн. I. – 360 с. Кн. II. – 477 с.

3. Яворская О. Я. Термомеханика: Библиографический указатель отечественной и иностранной литературы за 1977-1981гг. В трех книгах / О. Я. Яворская, Ю. М. Коляно, М. М. Семерак. – Львов: изд-во Львовская научная библиотека им. В. Стефаника АН УССР, 1986. – Кн. I. – 354 с., Кн. II. – 364 с., Кн. III. – 397 с.

3. ДСТУ Б В 1.1-4-98 Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробування на вогнестійкість. Загальні вимоги. Київ: Держбуд України, 1999. – 21с.

4. Огнезащита железобетонных несущих конструкций тонкослойными покрытиями / Кривцов Ю., Ламкин О., Рубцов В., Габдулин Р. // Мир и безопасность. №4 (66) июль – август. – М., 2006. – С. 23-26.

5. Лыков А. В. Теория теплопроводности / Лыков А. В. – М.: Высшая школа, 1967. – 600с.

6. Тимошенко С. П. Теория упругости / С. П. Тимошенко, Дж. М. Гудер. – Наука, 1975. – 576 с.

М.М. Семерак, А.М. Доминик, В.М. Байтала, В.В. Чернецкий

ОГНЕСТОЙКОСТЬ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Исследовано напряженно-деформированное состояние несущей бетонной конструкции цилиндрической формы в условиях пожара. Предложена методика определения и исследования температурного поля в конструкции обусловленного резким изменением температуры внешней среды. Теплообмен между конструкцией и средой происходит по закону Ньютона. Определено и исследовано напряженно-деформированное состояние конструкции обусловленное температурой. На основе проведенных исследований предложена методика определения предела огнестойкости цилиндрической колонны по признаку потери несущей способности, потери целостности и теплоизоляционной способности. Результаты исследований изображены графически.

Ключевые слова: огнестойкость бетонных конструкций, температурное поле, перемещения, термонапряжённое состояние

М.М. Semerak, A.M. Dominik, B.M. Baytala, B.V. Chernetsky

FIRE RESISTANCE OF CYLINDRICAL CONCRETE STRUCTURES

The stress strain state of bearing cylindrical concrete structure during fire is investigated. The definition and research technique of the temperature field in the structure, caused by the abrupt change of ambient temperature, is proposed. Heat exchange between design and environment happens according to the Newton law. The stress-strain state of structures due to temperature is determined and researched. On the basis of the research a method of determining the fire resistance limits of cylindrical columns on the basis of carrying capacity loss, loss of integrity and insulating properties, is proposed. The results are depicted graphically.

Key words: fire resistance of concrete structures, temperature field, displacement, thermal stress state.

