

**РОЗРОБЛЕННЯ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ ОБТ**

УДК: 614.841

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.20.2019.3-8>Т.Я. Глова<sup>1</sup>, Р.А. Ковальчук<sup>1</sup>, Б.М. Кузніцька<sup>2</sup><sup>1</sup>Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів<sup>2</sup>Львівський національний аграрний університет, Дубляни**ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ЗА ДІЇ ТЕМПЕРАТУРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

Досліджено нестационарне температурне поле в циліндричній бетонній колоні, яке змінюється з часом за умов високих температур. При моделюванні процесу нагрівання колони враховані крайові умови третього роду. Використовуючи перетворення Лапласа, отримано аналітичні вирази для дослідження температурного поля. Визначено напружено-деформований стан колони із заземленими та вільними кінцями, зумовлений нестационарним температурним полем, де було враховано різні значення коефіцієнта теплообміну між колоною та середовищем.

**Ключові слова:** бетон, міцність, розподіл температури, температурні напруження, деформації, вогнестійкість.

**Постановка проблеми**

Бетонні та залізобетонні конструкції залишаються основними складовими частинами житлових і господарських будинків, а також інженерних споруд спеціального призначення – мостів, естакад тощо. У зв'язку зі значним зростанням обсягів будівництва монолітно-каркасних будівель підвищеної поверховості актуальним стає питання пожежної безпеки при експлуатації, в першу чергу, колон і пілонів, що працюють на стиск, оскільки послаблення таких елементів може призвести до руйнування споруди в цілому. Досвід експлуатації бетонних та залізобетонних конструкцій свідчить про їхній достатній запас несучої здатності за умов відсутності непередбачуваного високотемпературного впливу. Однак однією з найбільш істотних причин підвищеної небезпеки для таких конструкцій розглядається нерівномірний нагрів і зміна характеристик міцності і деформативності бетону під час і після пожежі. При цьому необхідно вирішувати питання, пов'язані із забезпеченням тривалої та надійної експлуатації будівельних конструкцій, в тому числі при дії високих температур за рахунок прийняття відповідних матеріалів або захисних покриттів, визначення напружено-деформованого стану (НДС) конструкцій при різних впливах і виконання робіт із продовження терміну експлуатації як окремих конструкцій, так і будівель у цілому.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Задачі перевірки міцності стержневих конструкцій, зокрема і з урахуванням дії температури, детально розглядаються у працях [2, 3]. Основні аспекти теорії теплопровідності, а також вплив температурних полів на напружено-деформований стан елементів конструкцій висвітлені у книгах [1, 6], а вплив температурних навантажень на властивості бетону та залізобетону – у працях [4, 5]. Аналіз існуючих досліджень свідчить про те, що проблеми оцінювання стану конструкцій, які зазнають термосилового впливу, вивчені недостатньо. У зв'язку з цим дослідження характеру роботи бетонних і залізобетонних конструкцій, зокрема циліндричних елементів, що сприймають термосилові навантаження, є актуальним та важливим завданням. Актуальність роботи підтверджується збільшенням в останні роки аварій споруд, пов'язаних з температурними впливами великої інтенсивності, зокрема, і в зоні бойових дій на Сході України.

**Формулювання мети статті**

Визначення та аналіз напружено-деформованого стану бетонних циліндричних стержнів (колон) при дії високих температур з урахуванням рівняння теплопровідності.

**Виклад основного матеріалу**

Розглянемо бетонну циліндричну колону радіуса  $R$ , початкова температура якої  $T_0$ ,

нагрівається від пожежі, температура якої  $T_n$ . Дослідимо температурне поле бетонної колони, яке змінюється з радіусом і часом, а також залежить від коефіцієнта теплообміну між колоною та температурним середовищем. Для знаходження температурного розподілу по товщині колони, яке змінюється з часом, розв'яжемо диференціальне рівняння нестационарної теплопровідності [1]

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

$$t > 0; 0 < r < R$$

крайові умови запишемо у вигляді:

$$T(r,0) = T_0, \quad (2)$$

$$-\frac{\partial T(R,t)}{\partial r} + \alpha(T_n - T(R,t)) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T(0,t)}{\partial r} = 0, \quad (4)$$

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

$c$  – питома теплоємність,  $\frac{Дж}{кг \cdot K}$ ;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\frac{Вт}{м \cdot K}$ ;

$\rho$  – густина,  $\frac{кг}{м^3}$ ;

$t$  – час,  $с$ ;

$T_0$  – початкова температура,  $^{\circ}C$ ;

$T_n$  – температура пожежі,  $^{\circ}C$ ;

$\alpha$  – коефіцієнт теплообміну,  $\frac{Вт}{м^2 \cdot K}$ .

Застосовуючи перетворення Лапласа до рівняння (1) і крайових умов (2)-(4) отримаємо розв'язок [1]

$$T(r,t) = T_0 + (T_n - T_0) \cdot \left( 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot J_1(\mu_n)}{J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)} J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) e^{-\mu_n^2 Fo} \right), \quad (5)$$

де  $J_0(\mu_n)$ ,  $J_1(\mu_n)$  – функції Бесселя першого роду нульового і першого порядку відповідно;

$\mu_n$  – корені характеристичного рівняння

$$\frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} = \frac{\mu}{Bi};$$

$Fo = \frac{at}{R^2}$  – критерій Фур'є;

$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}$  – критерій Біо.

За формулою (5) проведені розрахунки розподілу температури в бетонній колоні вздовж радіуса  $r$ , для якої прийняті такі теплофізичні характеристики:

$$\rho = 2200 \frac{кг}{м^3}, \lambda = 1,55 \frac{Вт}{м \cdot K}, c = 770 \frac{Дж}{кг \cdot K},$$

$$T_0 = 20 \text{ } ^{\circ}C, R = 0,15 \text{ м}.$$

Результати розрахунків представлені на рис. 1, 2.

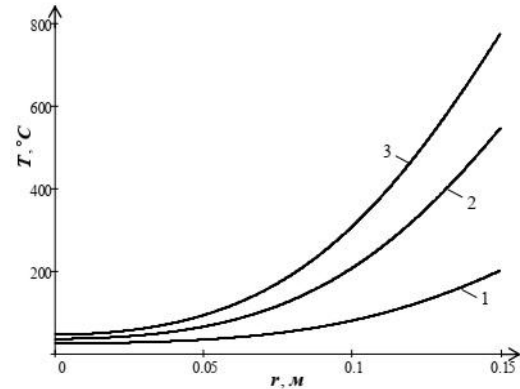


Рис. 1. Розподіл температури вздовж радіуса колони при  $t = 30$  хв:

1 –  $Bi = 0,5$ ; 2 –  $Bi = 2$ ; 3 –  $Bi = 4$

Аналіз рис. 1 показує, що при збільшенні коефіцієнта теплообміну між колоною та середовищем збільшується температура нагріву колони, а також збільшується температурний градієнт у зв'язку з малим коефіцієнтом теплопровідності, що призводить до різкого нагрівання приповерхневого шару колони.

Дослідимо швидкість нагріву приповерхневого шару колони, яка залежить від критерію Біо, який в свою чергу залежить від коефіцієнтів теплообміну.

Результати аналітичних досліджень відобразимо графічно

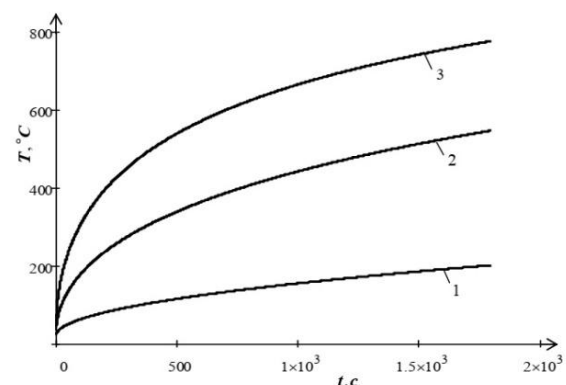


Рис. 2. Залежність температури від часу на поверхні колони  $r = R$ :

1 –  $Bi = 0,5$ ; 2 –  $Bi = 2$ ; 3 –  $Bi = 4$

Для оцінки несучої здатності бетонної колони за умов високих температур потрібно дослідити її

термонапружений стан, зумовлений зміною температури, часом нагрівання та температурного градієнта. Для цього розглянемо два випадки і порівняємо їх температурні напруження.

1. Розглянемо напружено-деформований стан колони, торці якої закріплені, тобто осьове відносне видовження  $\varepsilon_z = 0$ . Радіальне переміщення  $U$  точок поперечного перерізу колони можна знайти, розв'язавши диференціальне рівняння [2]

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

де  $U$  – переміщення, м;

$\alpha_t$  – температурний коефіцієнт лінійного розширення,  $\frac{1}{K}$ ;

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона.

Рівняння (6) можна переписати у вигляді

$$\frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \frac{d(rU)}{dr} \right] = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_t \frac{dT}{dr},$$

яке після інтегрування буде мати вигляд

$$U = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_t \frac{1}{r} \int_0^r T(r,t) r dr + C_1 r + \frac{C_2}{r}.$$

Напруження, які діють в радіальному  $\sigma_r$ , кільцевому  $\sigma_\theta$  та осьовому  $\sigma_z$  напрямках, запишемо у вигляді [2]:

$$\sigma_r = -\frac{\alpha_t E}{1-\nu} \frac{1}{r^2} \int_0^r T(r,t) r dr + \frac{E}{1+\nu} \left( \frac{C_1}{1-2\nu} - \frac{C_2}{r^2} \right),$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha_t E}{1-\nu} \frac{1}{r^2} \int_0^r T(r,t) r dr + \frac{E}{1+\nu} \left( \frac{C_1}{1-2\nu} + \frac{C_2}{r^2} \right) - \frac{\alpha_t E T(r,t)}{1-\nu},$$

$$\sigma_z = C_1 \frac{2E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} - \frac{\alpha_t E T(r,t)}{1-\nu},$$

де  $E$  – модуль Юнга, Па.

Сталі  $C_1$  і  $C_2$  знаходяться з граничних умов, тобто з відсутності переміщень  $U = 0$  при  $r = 0$  та рівності нулю радіальних напружень  $\sigma_r|_{r=R} = 0$ .

Отже,

$$U = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_t \left( (1-2\nu) \frac{r}{R^2} \int_0^R T(r,t) r dr + \frac{1}{r} \int_0^r T(r,t) r dr \right), \quad (7)$$

$$\sigma_r = \frac{\alpha_t E}{1-\nu} \left( \frac{1}{R^2} \int_0^R T(r,t) r dr - \frac{1}{r^2} \int_0^r T(r,t) r dr \right), \quad (8)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha_t E}{1-\nu} \left( \frac{1}{R^2} \int_0^R T(r,t) r dr + \frac{1}{r^2} \int_0^r T(r,t) r dr - T(r,t) \right), \quad (9)$$

$$\sigma_z = \frac{\alpha_t E}{1-\nu} \left( \frac{2\nu}{R^2} \int_0^R T(r,t) r dr - T(r,t) \right). \quad (10)$$

Враховуючи температурний розподіл за товщиною колони за різних коефіцієнтів теплообміну, знайдемо температурні напруження та отримані результати зобразимо графічно, де фізико-механічні характеристики бетону  $\alpha_t = 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$ ;  $\nu = 0,16$ ;  $E = 0,23 \cdot 10^{11}$  Па

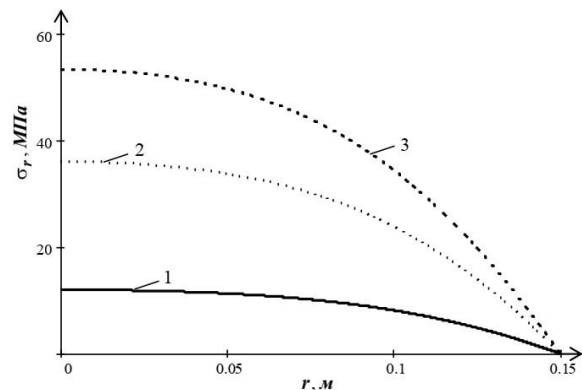


Рис. 3. Розподіл радіальних напружень колони при  $t = 30$  хв:

1 –  $Bi = 0.5$ ; 2 –  $Bi = 2$ ; 3 –  $Bi = 4$

Аналіз графічних досліджень рис. 3 показує, що радіальні напруження досягають свого максимального значення у центрі поперечного перерізу і є напруженнями розтягу та збільшують своє значення від збільшення коефіцієнта теплообміну.

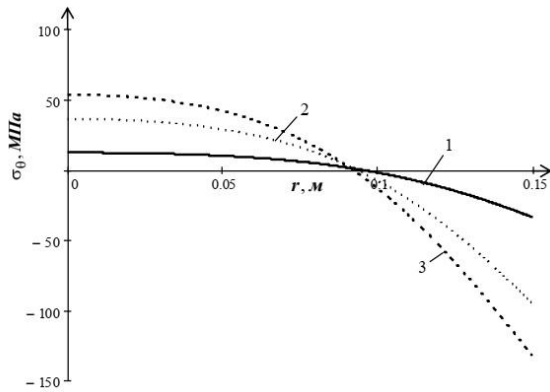


Рис. 4. Розподіл кільцевих напружень колони при  $t = 30$  хв:

1 –  $Bi = 0.5$ ; 2 –  $Bi = 2$ ; 3 –  $Bi = 4$

Кільцеві температурні напруження рис. 4 досягають свого максимального значення в приповерхневих шарах і є стискаючими, а в центрі поперечного перерізу колони кільцеві напруження діють на розтяг.

Використовуючи формулу (10), обчислимо осьові напруження і результати зобразимо графічно.

Аналіз графічних досліджень рис. 5 показують, що осьові температурні напруження є найбільшими та досягають свого максимального значення в приповерхневих шарах і ці напруження є стискаючими. Тобто, якщо  $Bi = 4$ , то при  $r = R$  осьові напруження  $\sigma_z = 235$  МПа.

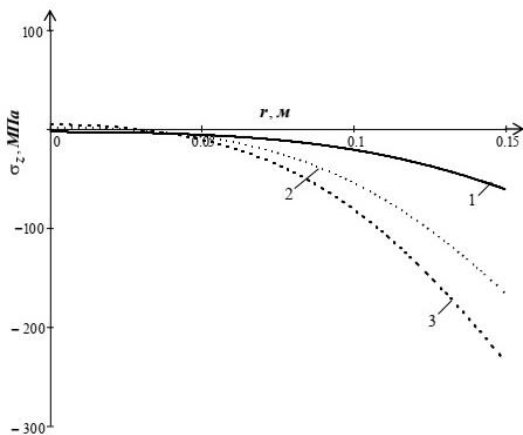


Рис. 5. Розподіл осьових напружень колони при  $t = 30$  хв:

1 –  $Bi = 0.5$ ; 2 –  $Bi = 2$ ; 3 –  $Bi = 4$

Використовуючи формулу (7), дослідимо радіальні переміщення колони під час її нагріву при різних коефіцієнтах теплообміну.

При нагріванні бетонної колони здійснюється радіальне переміщення, яке змінюється в залежності від температури і часу нагріву. З графічних досліджень рис. 6 можна зробити висновок, що при  $Bi = 4$  радіальне переміщення колони  $U = 7,723 \cdot 10^{-4}$  м і збільшується із збільшенням температурного градієнту.

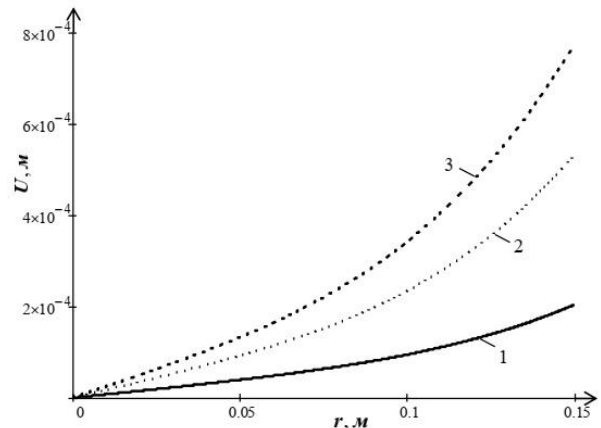


Рис. 6. Радіальне переміщення колони за  $t = 30$  хв:

1 –  $Bi = 0.5$ ; 2 –  $Bi = 2$ ; 3 –  $Bi = 4$

2. Розглянемо напружено-деформований стан колони, при рівній нулю осової сили, тобто  $F_z = 0$ . У цьому випадку  $\sigma_r$  і  $\sigma_\theta$  такі самі, як при  $\varepsilon_z = 0$ , тому

$$U = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_t \left( \frac{1-3\nu}{1+\nu} \frac{r}{R^2} \int_0^R T(r,t) r dr + \frac{1}{r} \int_0^r T(r,t) r \right) \quad (11)$$

$$\sigma_z = \frac{\alpha_t E}{1-\nu} \left( \frac{2}{R^2} \int_0^R T(r,t) r dr - T(r,t) \right). \quad (12)$$

Враховуючи фізико-механічні характеристики бетону, які у попередньому випадку, знайдемо осьові напруження

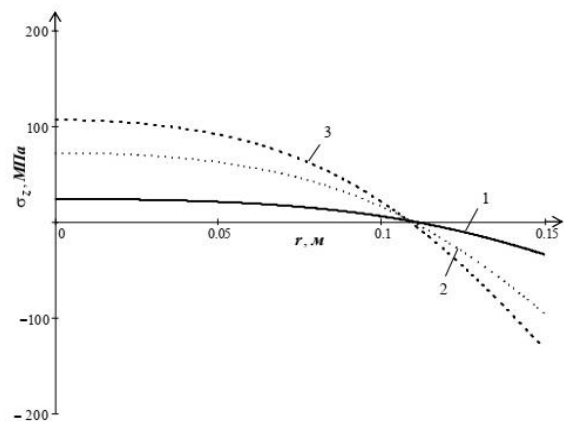


Рис. 7. Розподіл осьових напружень колони при  $t = 30$  хв. і  $F_z = 0$ :

1 –  $Bi = 0.5$ ; 2 –  $Bi = 2$ ; 3 –  $Bi = 4$

З рис. 5 і рис. 7 можна зробити висновок, що у центрі колони при  $Bi = 4$  осьові напруження при защемлених кінцях є набагато меншими, і ці напруження діють на розтяг. А в приповерхневому шарі, навпаки, осьові напруження при ( $\varepsilon_z = 0$ ) є більшими і діють на стиск.

Дослідимо радіальне переміщення за формулою (11).

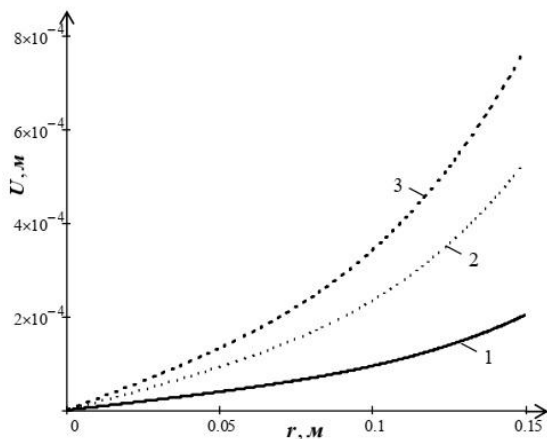


Рис. 8. Радіальне переміщення колони за  $t = 30$  хв:  
1 –  $Bi = 0.5$ ; 2 –  $Bi = 2$ ; 3 –  $Bi = 4$

Аналіз графічних досліджень рис. 6 і рис. 8 показує, що у випадку заземлених кінців колони ( $\varepsilon_z = 0$ ) максимальне радіальне переміщення  $U = 7,723 \cdot 10^{-4}$  м, а у випадку ( $F_z = 0$ ) максимальне радіальне переміщення  $U = 6,657 \cdot 10^{-4}$  м при  $r = R$  і  $Bi = 4$ .

### Висновки

Отримані графічні залежності радіальних, кільцевих та осевих напружень від радіуса в результаті дії температурних полів різної інтенсивності на стержневі елементи. На величину та характер

розподілу напружень впливає як нерівномірне нагрівання, так і спосіб закріплення стержня. Слід відмітити, що осеві напруження в перерізах стержня будуть виникати як з вільними кінцями, так і з закріпленими, характерним є виникнення суттєвих розтягувальних напружень в околі осі стержня за відсутності закріплення торців. З урахуванням низької границі міцності бетону на розтяг, це становить небезпеку для бетонних колон.

### Список літератури

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
2. Тимошенко С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудер. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
3. Писаренко Г.С. Опір матеріалів / Г.С. Писаренко, О.А. Квітка, Є.С. Уманський. 2-ге вид., допов. і переробл. – К.: Вища шк., 2004. – 655 с.
4. Мосалков И.Л. Огнестойкость строительных конструкций / И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина, А.Ю. Фролов. – М.: Спецтехника, 2001. – 484 с.
5. Барашиков А.Я. Теплотехнічні властивості бетону / А.Я. Барашиков, В.М. Колякова, Наро Халік // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2008. – Вип. 17. – С. 3–7.
6. Мелан Е. Термоупругие напряжения, вызываемые стационарными температурными полями / Е. Мелан, Г. Паркус. – М.: Физматгиз, 1958. – 166 с.

**Рецензент:** доктор технічних наук, професор З.А. Стоцько, Національний університет “Львівська політехніка”, Львів.

### Исследование напряженно-деформированного состояния цилиндрических элементов инженерных сооружений специального назначения из-за действия температурной нагрузки

Т.Я. Глова, Р.А. Ковальчук, Б.Н. Кузницкая

Исследовано нестационарное температурное поле в цилиндрической бетонной колонне, которое меняется со временем в условиях высоких температур. При моделировании процесса нагрева колонны учтены краевые условия третьего рода. Используя преобразования Лапласа, получены аналитические выражения для исследования температурного поля. Определено напряженно-деформированное состояние колонны с ущемленными и свободными концами, обусловленное нестационарным температурным полем, где были учтены различные значения коэффициента теплообмена между колонной и средой.

**Ключевые слова:** бетон, прочность, распределение температуры, температурные напряжения, деформации, огнестойкость.

### RESEARCH OF THE STRESS-STRAIN STATE OF CYLINDRICAL ELEMENTS OF ENGINEERING CONSTRUCTIONS OF SPECIAL PURPOSE UNDER THE EFFECT OF TEMPERATURE LOAD

T. Hlova, R. Kovalchuk, B. Kuznitska

Active development of monolithic-frame construction in the recent period of time requires a new approach to the calculation of elements of building structures. Concrete columns are one of the most important elements of such buildings, the failure of which is of great durability. Loss of strength characteristics of the column may occur as a result of the loads caused by the effect of temperature fields. Therefore, research related to the influence of temperature on the supporting elements of structures of military objects, is relevant and of great importance.

The non-stationary temperature field in a cylindrical concrete column, which changes over time under high temperatures, is investigated. When modeling the heating process of a column, the boundary conditions of the third kind are taken into account. Using the Laplace transform, we obtained analytical expressions for the research of a temperature field. The stress-strain state

of the column with pinched and free ends is determined, which is caused by a non-stationary temperature field, where various values of the heat transfer coefficient between column and the environment were taken into account.

One of the most significant causes of increased danger for such structures is uneven heating and changes in the characteristics of strength and deformability of concrete during and after the fire. At the same time it is necessary to solve the issues connected with ensuring sustainable and reliable operation of building structures, including the influence of high temperatures, due to the adoption of appropriate materials or protective coatings. Thus, mathematical modeling of the processes of temperature fields in a stress-strain state of cylindrical structures can significantly increase accuracy of calculations, which contributes to the strength and reliability of engineering structures. The graphic dependences of radial, ring, and axial stresses from the radius are researched as a result of the temperature fields of different intensity on the rod elements are obtained and we have found radial displacement at different temperature.

**Keywords:** concrete, strength, temperature distribution, temperature stress, deformation, fire resistance.

УДК 681.35

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.20.2019.8-13>

С.І. Глухов

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

## ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ФІЗИЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ДЛЯ НОВОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

В роботі показано використання методів фізичного діагностування для визначення технічного стану цифрових пристроїв блоків об'єктів радіоелектронної техніки. На відміну від методів функціонального діагностування, які сьогодні широко застосовуються, запропоновані методи дозволяють визначити реальний технічний стан даних пристроїв. Представлені фрагменти схем для пояснення механізмів отримання діагностичної інформації, а також графіки зміни діагностичних параметрів від часу, отримані в результаті проведення прискорених випробувань на надійність радіоелектронних компонентів як складових цифрових пристроїв. Показано, що причиною поступового виходу з ладу будь-якого блока або цифрового пристрою, як правило, є ендогенні фактори, в якості яких виступають деградаційні процеси, що відбуваються у кристалі напівпровідника, чим і була зумовлена актуальність проведення форсованих випробувань зазначених елементів.

Комплексне застосування діагностичної інформації, отриманої при використанні методів фізичного діагностування, а також результатів форсованих випробувань радіоелектронних компонентів запропоновано для побудови нової автоматизованої системи технічного діагностування радіоелектронної техніки, впровадження якої в сучасних воєнно-політичних умовах України дозволить не тільки заощадити значні кошти, а і покращити основні показники надійності зразків радіоелектронної техніки.

**Ключові слова:** радіоелектронні компоненти, радіоелектронна техніка, цифрові пристрої, технічний стан, методи фізичного діагностування, прогнозування.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Методи функціонального діагностування [1, 2], які сьогодні широко використовуються для визначення технічного стану цифрових пристроїв (ЦП) блоків об'єктів радіоелектронної техніки (РЕТ), передбачають надходження на їх входи тестових послідовностей, а визначення технічного стану проводиться на основі порівняння отриманих вихідних реакцій з еталонними. Рішення про справний технічний стан приймається у випадках відповідності даних реакцій. У цифровій техніці сигнали представлені у

виді двійкових послідовностей (порогових значень логічної одиниці та логічного нуля), що надає багато їй переваг в порівнянні з аналоговою. Втім, при критичних станах напівпровідників (стан виродження кристалів) інтегральних схем сигнали на виході ЦП будуть відповідати еталонним, що підтверджує складність застосування зазначених методів діагностування для визначення реального технічного стану складових блоків РЕТ та його прогнозування; крім того, стає практично неможливим визначення часу експлуатації, а також остаточного ресурсу безвідмовної роботи.