



<https://doi.org/10.15407/scin16.02.055>

М.Г. СУР'ЯНІНОВ¹, Ю.А. ОТРОШ², П.Г. БАЛДУК¹, І.Ф. ДАДАШОВ³

¹Одеська державна академія будівництва та архітектури,
вул. Дідріхсона, 4, Одеса, 65029, Україна,
+380 50 333 3754, sng@ogasa.org.ua

²Національний університет цивільного захисту України,
вул. Чернишевська, 94, Харків, 61023, Україна,
+380 63 794 5621, yuriyotrosh@gmail.com

³Академія МНС Азербайджанської Республіки,
вул. Ельмана Гасимова, 8, пос. Говсани, Баку, AZ1089, Азербайджан,
+994 50 516 7695, llgardadashov.69@gmail.com

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА КОМП'ЮТЕРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОЛОН ЗА ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ ВПЛИВІВ

***Вступ.** Незадовільний технічний стан багатьох будівель та споруд є наслідком їх старіння та потребує невідкладної оцінки технічного стану.*

***Проблематика.** Оскільки аналітично складно описати напружено-деформований стан конструкцій, необхідно проводити експериментальні дослідження. Найбільш перспективним шляхом верифікації таких досліджень є комп'ютерне моделювання конструкцій, зокрема й їхнього стану під час пожежі.*

***Мета.** Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану залізобетонної колони за високих температур та комп'ютерне моделювання цього процесу з подальшим його аналізом.*

***Матеріали й методи.** Проведено експериментальні вогневі випробування залізобетонних колон з метою визначення проміжку часу від початку випробування до настання нормованого для колони граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати опорної здатності в умовах стандартного температурного режиму. Характеристики бетону колон після виготовлення визначено неруйнівними методами. З метою оцінки якості експерименту та достовірності отриманого розподілу температур виконано комп'ютерне моделювання обох колон у програмному комплексі ANSYS R.17.1.*

***Результати.** Проведено порівняльний аналіз результатів експериментальних досліджень та даних комп'ютерного моделювання. Розподіл температурного поля по колоні є неоднозначним і залежить від розташування контрольних точок.*

***Висновки.** Підтверджено, що методика проведених експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання з подальшим чисельним аналізом може бути рекомендовано для практичного застосування. Математична модель дає можливість оперативного прогнозування значень контрольованих параметрів будівельних конструкцій. Висновок про експлуатаційну придатність будівельних конструкцій з врахуванням можливої тенденції до погіршення їхнього технічного стану при силових та високотемпературних впливах має рекомендаційний характер.*

Ключові слова: ANSYS, пожежа, комп'ютерне моделювання, залізобетонні колони, будівельні конструкції.

Цитування: Сур'янінов М.Г., Отрош Ю.А., Балдук П.Г., Дадашов І.Ф. Експериментальні та комп'ютерні дослідження залізобетонних колон за високих температурних впливів. *Nauka innov.* 2020. Т. 16, № 2. С. 55–61. <https://doi.org/10.15407/scin16.02.055>

ISSN 1815-2066. *Nauka innov.* 2020. 16(2)

Незадовільний технічний стан багатьох будівель та споруд є наслідком їх старіння та потребує невідкладного оцінювання технічного стану, щоб запобігти виникненню надзвичайних ситуацій [1–2]. Ступінь пошкодження залізобетонних конструкцій внаслідок пожежі визначити дуже складно. Різноманітність фізико-механічних властивостей матеріалів, що складають залізобетон, при високих температурах призводить до їх різних температурних деформацій, порушуються взаємозв'язки між окремими компонентами [3–4]. Багатоплановість змін, що відбуваються, робить практично неможливим аналітичний опис напружено-деформованого стану конструкцій [5] і доводиться вдаватися до результатів експериментальних досліджень. Однак ці результати, зазвичай, мають суттєвий діапазон значень і залежать від безлічі факторів. Тому необхідною є верифікація даних експерименту. Найбільш перспективним шляхом для її виконання є, на наш погляд, комп'ютерне моделювання конструкції під час пожежі, яке можна реалізувати за допомогою низки сучасних скінчено-елементних програм, однією з яких є пакет ANSYS [6, 7].

Метою роботи є експериментальні дослідження напружено-деформованого стану залізобетонної колони при дії високих температур та комп'ютерне моделювання зазначеного процесу з подальшим порівнянням результатів в контрольних точках.

Колони, як вертикально орієнтовані опорні будівельні конструкції стрижневої форми, можуть піддаватися впливу вогню під час пожежі з чотирьох або трьох сторін. Для проведення випробувань на вогнестійкість зазначених конструкцій в УкрНДІЦЗ розроблено національний стандарт ДСТУ Б В.1.1-13:2007 «Захист від пожежі. Колони. Метод випробування на вогнестійкість» (EN 1365-3:1999, NEQ) [8]. Стандарт призначено для визначення межі вогнестійкості колон, що виконані із залізобетону, деревини тощо, а також металевих колон із вогнезахисним покриттям або облицюванням.

Суть методу випробування полягає у визначенні проміжку часу від початку впливу до настання нормованого для колони граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати опорної здатності (R) в умовах стандартного температурного режиму за ДСТУ Б В.1.1-4-98* [9].

Стандартний температурний режим характеризується стандартною кривою зміни температури залежно від часу випробування конструкцій на вогнестійкість [10, 11]:

$$t = 345 \lg(8\tau + 1) + t_e, \quad (1)$$

де t – температура середовища; τ – час, хв; t_e – початкова температура.

Граничним станом за ознакою втрати опорної здатності для колон, які випробовують під навантаженням, а також для залізобетонних колон, які випробовують без навантаження, є обвалення зразка або виникнення граничних значень температур для металевих колон з вогнезахисним облицюванням.

Якщо випробовують зразки залізобетонної колони без навантаження, то для визначення межі вогнестійкості необхідно встановити не менше, ніж 10 термопар рівномірно по товщині у центрі зразка.

Для зразків залізобетонних колон, які випробовували без навантаження, час досягнення граничного стану за ознакою втрати опорної здатності визначають за даними вимірювань температури по товщині зразка розрахунковим методом, який має відповідати вимогам ДБН В.1.1-7-2016 [12].

Значення межі вогнестійкості та клас вогнестійкості колони визначають відповідно до ДСТУ Б В.1.1-4-98* [8].

Для випробувань на Броварському заводі залізобетонних виробів було виготовлено два ідентичні зразки (зразок № 1 і зразок № 2) залізобетонних колон у металевій опалубці перерізом 600×600 мм та заввишки 2000 мм. Кожен зразок мав опорний арматурний каркас, який складався з восьми поздовжніх арматурних стержнів $\varnothing 20$ мм класу А400С за ДСТУ 3760:2006 [13]. Поперечну арматуру прийнято $\varnothing 10$ мм



Рис. 1. Загальний вигляд арматурного каркасу зразка колони

класу А240С та встановлено по зовнішньому контуру поздовжніх арматурних стержнів. Крім того, було вживлено арматуру $\varnothing 10$ мм А240С, яка об'єднала між собою центральні стержні по кожній грані (рис. 1).

Крім цього, було виготовлено допоміжні зразки (куби, призми, фрагменти арматурних стержнів), випробування яких дозволило отримати дані про фізико-механічні характеристики використаних матеріалів.

Усі зразки було виготовлено з бетону одного складу. Витрата матеріалів на 1 м^3 суміші становила: цементу – 440 кг, піску – 660 кг, щебеню – 1150 кг, води – 153 л, хімічної добавки (релаксол-лідер) – 17 кг. Водоцементне співвідношення (вода:цемент) склало 0,35, осідання конуса – 14–15 см. Проектний клас бетону – В25.

Після розпалубки колони і допоміжні зразки зберігалися протягом 28 діб.

Для встановлення однорідності та характеристик застосованого бетону після виготовлення колон було проведено інструментальні дослідження неруйнівними методами. Визначення міцності бетону кубів, призми і колон було виконано ультразвуковим методом за ДСТУ Б В.2.7-226:2009 [14].

Кількість та розташування контрольованих ділянок в колонах було визначено відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7-214:2009 [15].

На першому етапі було виконано вимірювання в колонах до випробувань на вогнестійкість. Його проводили з використанням ультразвукового приладу УК-14ПМ з абсолютною по-

грішністю виміру часу t поширення ультразвуку $\pm 0,01t + 0,1$ мкс. Вимірювання виконували способом наскрізного звукового впливу з використанням механічно непов'язаних між собою п'єзоелектричних перетворювачів з резонансною частотою 60 кГц.

Для визначення міцності бетону в місцях контролю було використано базову градувальну залежність «швидкість—міцність», яку було складено для використаного приладу за багаторічними статистичними даними результатів порівняльних ультразвукових і механічних випробувань бетону класів С12/15, ..., С28/35, а також за даними випробувань кубів і призми. За результатами проведених дослі-

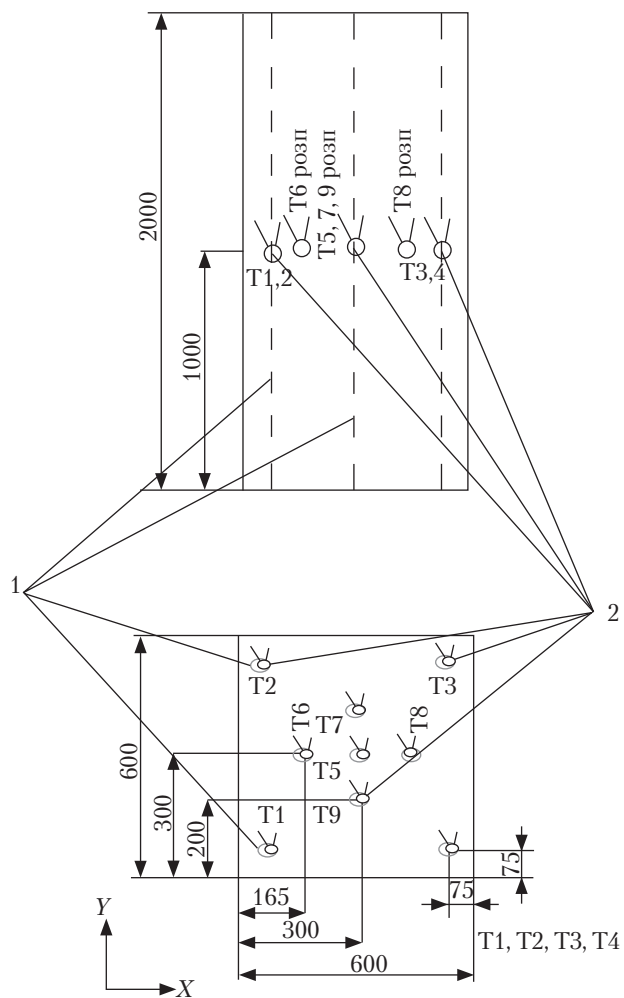


Рис. 2. Схема розміщення термопар в колоні

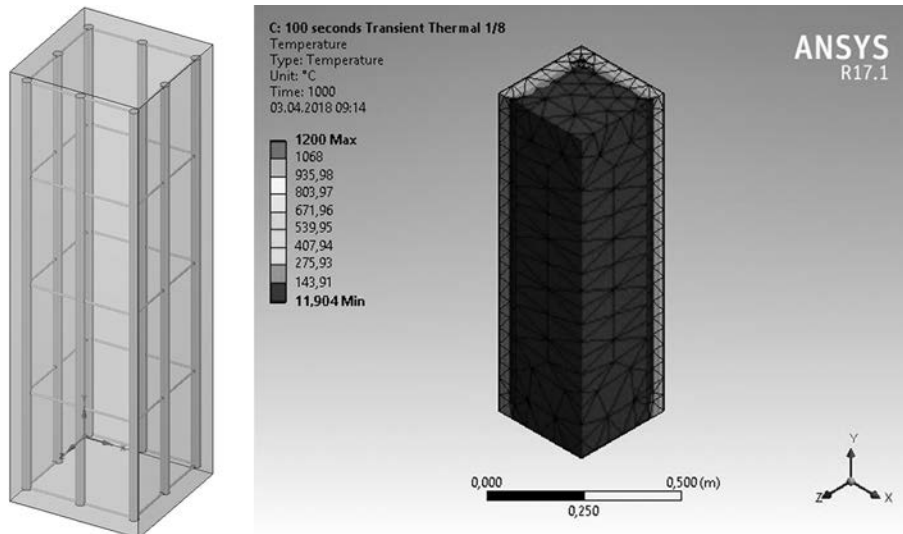


Рис. 3. Комп'ютерна модель колони

джен було встановлено, що бетон, який застосовано для виготовлення колон, за міцністю відповідає класу С20/25.

Після проведення попередніх випробувань наступним етапом було виконано випробування колон вогнем. Оскільки колони випробувалися без навантаження, межу вогнестійкості за ознакою втрати опорної здатності (R) було визначено, виходячи з розподілу температур по перерізу колони. Опорну здатність було оцінено за перевищенням середньої температури стержнів опорної арматури від початкового значення температури на $480\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для вимірювання температури опорної арматури зразків під час випробувань на чотирьох арматурах кожного зразка було встановлено термопари ТХА (Т1–Т4). Для отримання розподілення значень температури по перерізу зразка було встановлено по п'ять термопар ТХА (Т5–Т9) [16]. Схему розташування термопар наведено на рис. 2.

За результат випробування було прийнято межу вогнестійкості, яку визначено за формулою

$$t_{fr} = t_{mes} - \Delta t, \quad (2)$$

де t_{fr} – межа вогнестійкості, хв; t_{mes} – найменше значення часу від початку випробування

до досягнення граничного стану з вогнестійкості, хв; Δt – похибка випробування, хв.

Значення похибки Δt визначається за формулою:

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

де A_s , A_f , A_{min} – інтегральні значення стандартної температури, середньої температури в печі та мінімальної допустимої температури в печі, відповідно.

Втрата опорної здатності колони (зразок № 1) під час випробувань відбулась на 152 хв, оскільки значення середньої температури ($T_{1, cp}$) поздовжньої опорної арматури зразка перевищила початкове значення на $480\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Після випробувань було виконано обстеження колони. Встановлено, що бетонна поверхня колони зазнала суттєвих руйнувань у вигляді тріщин.

Втрати опорної здатності зразка № 2 під час випробувань не відбулося (значення середньої температури опорної арматури зразка не перевищило початкові значення на $480\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Після завершення було виконано розрізання колони з метою визначення характеру руйнування та характеристик бетону по перерізу. Розрізання виконано в умовах заводу на спе-

Таблиця. Порівняння експериментальних та комп'ютерних результатів

Час, хв	$T_{(1-4), \text{cp}}$	ANSYS	Похибка, %	T_5	ANSYS	Похибка, %	$T_{(6-9), \text{cp}}$	ANSYS	Похибка, %
0	6	8	25,0	6	7	14,3	6	7	14,3
10	19	23	17,4	7	7	0	7	7	0
20	61	70	12,9	9	8	11,1	9	8	11,1
30	105	116	9,5	17	16	5,9	19	17	10,5
40	129	143	9,8	36	33	8,3	55	50	9,1
50	163	180	9,4	67	61	8,9	85	77	9,4
60	199	220	9,5	98	89	9,2	100	91	9,0
70	238	263	9,5	103	94	8,7	102	93	8,8
80	279	308	9,4	103	94	8,7	104	95	8,7
90	319	353	9,6	104	95	8,6	107	98	9,3
100	355	393	9,7	108	98	9,2	119	108	9,2
110	382	423	9,7	114	104	8,8	123	112	8,9
120	409	453	9,7	124	113	8,9	135	123	8,9
130	437	484	9,7	137	125	8,8	150	136	9,3
140	463	512	9,6	152	139	8,6	166	151	9,0
150	484	536	9,7	170	155	8,8	185	168	9,2
152	487	539	9,6	174	159	8,6	190	173	9,0

ціалізованому обладнанні, воно дозволило встановити, що в кутових зонах і по периметру відбулося руйнування бетону з утворенням тріщин по колу. В центральній частині перерізу було сформовано ядро, яке майже не зазнало руйнувань під час випробувань.

Результати вимірювань фіксували кожної хвилини. В таблиці вони наведені для зразка № 1 з кроком 10 хвилин.

З метою оцінки якості експерименту та достовірності отриманого розподілу температур виконано комп'ютерне моделювання обох колон у програмному комплексі ANSYS R17.1 [6] (рис. 3, а) та показано (рис. 3, б) розподіл температур у колоні на 17 хвилині (зважаючи на симетрію, зображено тільки чверть колоні).

Аналіз таблиці показує, результати експериментальних досліджень і чисельного аналі-

зу в програмі ANSYS для перших 30 хвилин досить суттєво відрізняються у всіх контрольних точках, проте в подальшому ця відмінність стабілізується, і аж до закінчення експерименту не перевищує 10,0 %, що, на нашу думку, можна вважати цілком прийнятним.

Важливо, що розподіл температурного поля по колоні є нерівномірним, і залежить від розташування контрольних точок. Зокрема, величини температур, отриманих в ANSYS для точок, відповідних розташуванню термодатчиків Т1—Т4 (рис. 2), вищі, ніж за результатами експерименту, а для Т5—Т9 — нижчі.

Отримані результати підтверджують, що методика проведених експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання з подальшим чисельним аналізом може бути рекомендована для практичного застосування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Tiutiunyk V.V., Ivanets H.V., Tolkunov I.A., Stetsyuk E.I. System approach for readiness assessment units of civil defense to actions at emergency situations. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2018. № 1. С. 99—105. doi: 10.29202/nvngu/2018-1/7.

2. Otrosh Y., Kovalov A., Semkiv O., Rudeshko I., Diven V. Methodology remaining lifetime determination of the building structures. *MATEC Web of Conferences*. 2018. No. 230. P. 02023. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002023>.
3. Korneeva I., Neutov S., Suriyaninov M. Experimental studies of fiber concrete creep. *MATEC Web of Conferences*. 2017. No. 116. P. 02021. doi: 10.1051/mateconf/201711602021.
4. Kovalov A., Otrosh Y., Ostroverkh O., Hrushovinchuk O., Savchenko O. Fire resistance evaluation of reinforced concrete floors with fire-retardant coating by calculation and experimental method. *E3S Web of Conferences*. 2018. No. 60. P. 00003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000003>.
5. Surianinov M., Shyliaiev O. Calculation of plate-beam systems by method of boundary elements. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*. 2018. V. 7, no. 2. P. 238-241. doi: 10.14419/ijet.v7i2.23.11927.
6. Дашенко А.Ф., Лазарева Д.В., Сур'янінов Н.Г. ANSYS в задачах инженерной механики. Одесса, 2011. 505 с.
7. Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В. Основы работы в ANSYS 17. Москва, 2017. 210 с.
8. ДСТУ Б В.1.1-14:2007. Захист від пожежі. Колони. Метод випробувань на вогнестійкість (EN 1365-4: 1999, NEQ). Київ, 2007. 8 с.
9. ДСТУ Б В.1.1-4-98*. Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Київ, 2005. 18 с.
10. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. Москва, 1988. 143 с.
11. Поздеев С.В. Развитие научных основ назначения меж вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій: автореф. дис... докт. техн. наук. Харків, 2011. 40 с.
12. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Київ, 2017. 35 с.
13. ДСТУ 3760:2006 (ISO 6935-2:1991, NEQ). Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови. Київ, 2007. 26 с.
14. ДСТУ Б В.2.7-226:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Ультразвуковий метод визначення міцності. Київ, 2010. 33 с.
15. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. Київ, 2010. 43 с.
16. Andronov V., Pospelov B., Rybka E. Increase of accuracy of definition of temperature by sensors of fire alarms in real conditions of fire on objects. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. No. 4. P. 38–44. doi: 10.15587/1729-4061.2016.75063.

Стаття надійшла до редакції / Received 20.12.18

Статтю прорецензовано / Revised 15.04.19

Статтю підписано до друку / Accepted 07.05.19

Mykola Surianinov¹, Yuriy Otrosh², Pavlo Balduk¹,
and Ilgar Firdovs Dadashov³

¹Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture,
4, Didrickson St., Odesa, 65029, Ukraine,
+380 50 333 3754, sng@ogasa.org.ua

²National University of Civil Defence of Ukraine,
94, Chernishevskaya St., Kharkiv, 61023, Ukraine,
+380 63 794 5621, yuriyotrosh@gmail.com

³Academy of the Ministry of Emergency Situations of Azerbaijanian Republic,
8, Elman Gasimov St., Baku, Hovsan settlement, AZ1089, Azerbaijan,
+994 50 516 7695, llgardadashov.69@gmail.com

EXPERIMENTAL AND COMPUTER RESEARCH OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS UNDER HIGH TEMPERATURE EFFECTS

Introduction. The unsatisfactory technical condition of many buildings and structures is the result of their aging and requires a quick evaluation of the technical condition.

Problem Statement. It is necessary to conduct an experimental research, since it is analytically difficult to describe the stress-strain state of structures. The most promising way for verifying these experimental research data is computer simulation of structures, including in the condition of a fire. It is advisable to use the ANSYS software.

Purpose. To carry out experimental studies of the stress-strain state of a reinforced concrete column at a high temperature and to make a computer simulation of the process with subsequent comparison of the results.

Materials and Methods. Experimental fire tests of reinforced concrete columns have been conducted in order to determine the time interval between the start of the test and the establishment of normalized limit of fire resistance for the column based on the loss of bearing capacity in the conditions of normal temperature conditions. In order to evaluate the quality of the experiment and the reliability of the obtained temperature distribution, a computer simulation of the two columns using the ANSYS R.17.1 software has been made.

Results. A comparative analysis of the results of experimental studies and a numerical analysis have been done. The temperature field distribution in the column is ambiguous and depends on the location of control points.

Conclusions. The obtained results have confirmed that the experimental research and computer simulation with further numerical analysis can be recommended for practical use. The mathematical model makes it possible to operatively predict the controlled parameters of building structures. Conclusions on the operability of building structures with the possible tendency to deterioration of their technical condition under force impact and high temperature effects taken into consideration are advisory rather than mandatory.

Keywords: ANSYS, fire, computer simulation, concrete columns, and building structures.