

ГОДИШНИК НА УНИВЕРСИТЕТА ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ – СОФИЯ

Първа научно-приложна конференция с международно участие
„СТОМАНОБЕТОННИ И ЗИДАНИ КОНСТРУКЦИИ – ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА“

22 – 23 октомври 2015

22 – 23 October 2015

First Scientific-Applied Conference with International Participation

“REINFORCED CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES – THEORY AND PRACTICE”

ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY – SOFIA

48 ^{ТОМ}
vol.

2015

св.
fasc. 12 – II

НОСЕЩА СПОСОБНОСТ НА СТОМАНОБЕТОННИ СЕЧЕНИЯ СЪС СИМЕТРИЧНА АРМИРОВКА, ПОДЛОЖЕНИ НА РАВНИНЕН ИЛИ КОС НЕЦЕНТРИЧЕН НАТИСК ПРИ ЧЕТИРИСТРАННО ПОЖАРНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ

Х. Нешев¹, Я. Михов²

Ключови думи: стоманобетонни колони, огнеустойчивост

Научна област: строителни конструкции

РЕЗЮМЕ

Съставена е процедура за изчисляване на носещата способност на стоманобетонни сечения със симетрична армировка, подложени на равнинен или кос нецентричен натиск при стандартно или параметрично пожарно въздействие от всички страни.

Направено е сравнение между представената процедура за определяне на границата на огнеустойчивост на стоманобетонни колони и опростения изчислителен метод „Изотерма 500 °С”.

1. Въведение

При подлагане на стоманобетонни елементи на повишени температури възникват процеси, водещи до изменение на физико-механичните характеристики на използваните материали. Якостните параметри на бетона и армировъчната стомана намаляват с увеличаване на температурата. Под действие на външните въздействия елементът достига до крайно гранично състояние.

¹ Христиан Нешев, инж. докторант, кат. „Масивни конструкции”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: neshev_bg@abv.bg

² Явор Михов, проф. д-р инж., кат. „Техническа механика”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: mihov_fhe@uacg.bg

2. Напрегнато и деформирано състояние на сечения, подложени на равнинен или кос нецентричен натиск, при четиристранно пожарно въздействие

За стоманобетонни елементи, подложени на равнинен или кос нецентричен натиск (напр. колони), се приема, че е в сила хипотезата за равнинност на напречните сечения (хипотеза на Бернули) както при нормална, така и при повишена температура [1], [6], [7]. Съгласно тази хипотеза линейната (пълна, тотална) деформация за всяко сечение, от интегрирането на която се изчисляват преместванията, може да се запише като линейна функция на три параметъра [1], [6]:

$$\varepsilon_x = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot z + \alpha_3 \cdot y, \quad (1)$$

където $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ са параметри, характеризиращи деформацията;

y, z – координати на точката, в която се изчислява деформацията.

Механичната (чистата) деформация, може да се представи [1], [6]:

$$\varepsilon_{x,\theta} = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot z + \alpha_3 \cdot y - \alpha_t \cdot \theta, \quad (2)$$

където $\varepsilon_{c,t,\theta} = \alpha_t \cdot \theta$ е температурната деформация;

α_t – коефициент на температурно разширение на материала;

θ – температура в съответната точка на елемента.

Съгласно закона на Дюамел-Нойман връзката напрежения-деформации за материала или материалите в елемента, подложени на пожарно въздействие, се представя чрез [1], [6]:

$$\sigma_x = \bar{E} \cdot (\alpha_1 + \alpha_2 \cdot z + \alpha_3 \cdot y - \alpha_t \cdot \theta), \quad (3)$$

където \bar{E} е секущ модул на линейна деформация на материала.

За стоманобетонни колони се използва секущият модул на еластичност на бетона $E_{c,\theta}$ и на армировъчната стомана $E_{s,\theta}$ при повишени температури, определени съгласно математическия модел на зависимостите напрежения–деформации в [3].

$$\bar{E}_{c(s),\theta} = \frac{\sigma_{c(s),\theta}}{\alpha_1 + \alpha_2 \cdot z_{c(s)} + \alpha_3 \cdot y_{c(s)} - \alpha_{tc(s)} \cdot \theta_{c(s)}} \quad (4)$$

В настоящото изследване е отчетен и низходящият клон на математическия модел на зависимостите напрежения–деформации на бетона. В полза на сигурността якостта на опън на бетона е пренебрегната.

Връзката между разрезните усилия (нормална сила и огъващи моменти) и напреженията в напречното сечение е [1], [6]:

$$N_{fi,Ed} = \iint_A \sigma_{c,\theta} \cdot dA_c + \sum_{j=1}^n \sigma_{s,\theta,j} \cdot A_{s,j}, \quad (5)$$

$$M_{y,fi,Ed} = \iint_A \sigma_{c,\theta} \cdot z_c \cdot dA_c + \sum_{j=1}^n \sigma_{s,\theta,j} \cdot z_{s,j} \cdot A_{s,j}, \quad (6)$$

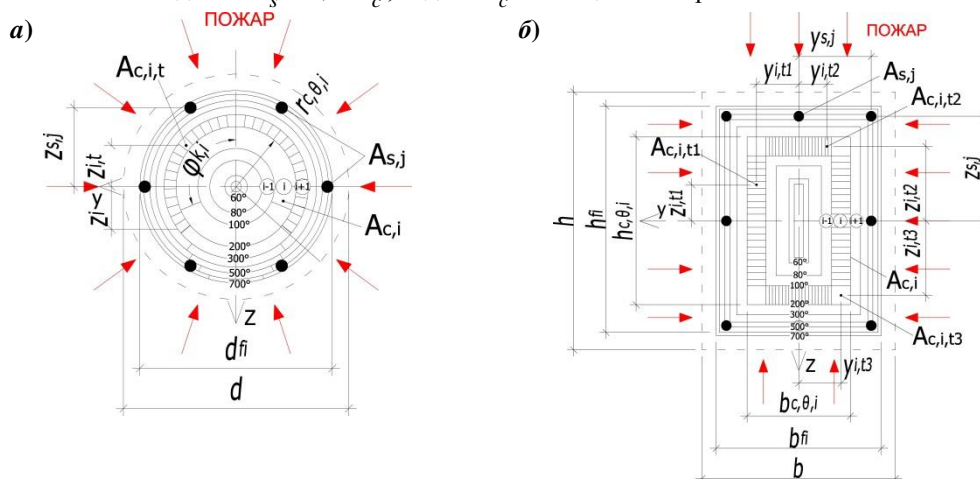
$$M_{z,fi,Ed} = \iint_A \sigma_{c,\theta} \cdot y_c \cdot dA_c + \sum_{j=1}^n \sigma_{s,\theta,j} \cdot y_{s,j} \cdot A_{s,j} \cdot \quad (7)$$

След заместване в уравнения (5)÷(7) на напреженията в бетона $\sigma_{c,\theta}$ и армировката $\sigma_{s,\theta}$, определени по уравнение 3, се изчисляват параметрите на деформацията $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$.

3. Изчисляване на напреженията и деформациите в крайно гранично състояние на стоманобетонни сечения със симетрична армировка, подложени на равнинен или кос нецентричен натиск, при четиристранно пожарно въздействие

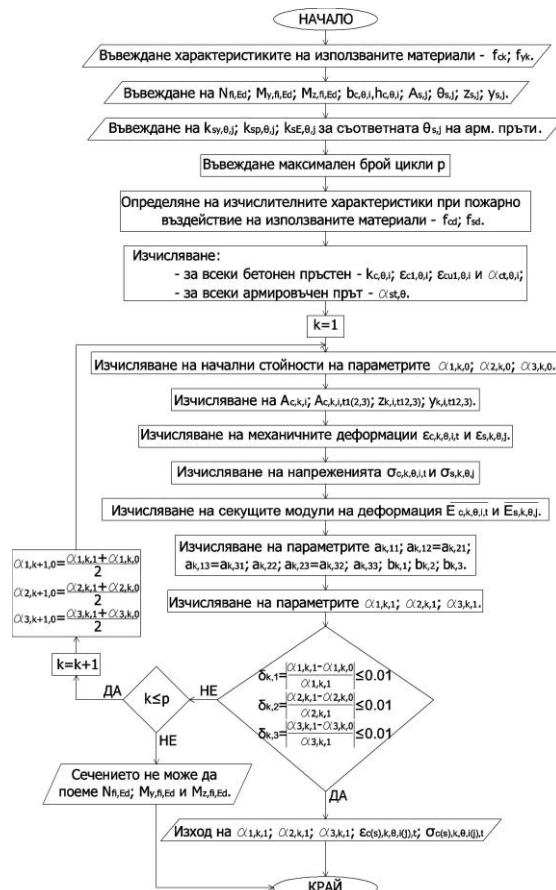
Разработената методика е валидна при следните предпоставки:

- в сила е хипотезата на Бернули;
- използват се нелинейни зависимости на бетона и армировъчната стомана при повишена температура съгласно [3];
- отчитат се температурните удължения на материалите при разрастване на пожарното въздействие;
- цилиндричната якост на натиск на бетона е $f_c \leq 50$ МРа (разглежда се обикновен бетон);
- якостта на опън на бетона се пренебрегва;
- деформациите от срязване са много малки и се пренебрегват;
- не се отчитат реологичните процеси (съсхване, пълзене), възникващи в бетона под действие на външното натоварване, преди и по време на пожарното въздействие;
- колоната е подложена на стандартно или параметрично пожарно въздействие;
- количеството на вложената надлъжна армировка извън зоната на снаждане е $A_s \leq 0,04A_c$, където A_c е площта на напречното сечение на бетона.



Фиг. 1. Схема на изотерми на а) кръгла колона; б) правоъгълна колона

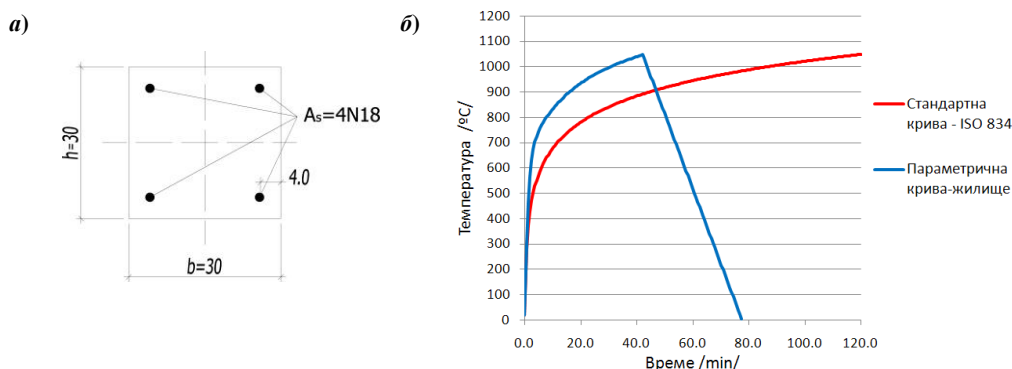
Напречното сечение на колоната се разделя на $m+1$ броя концентрични кръгли или правоъгълни пръстени с размери $d_{c,\theta,i}$ или $h_{c,\theta,i}$ и $b_{c,\theta,i}$ (фиг. 1) съгласно местоположението на изотермите (20 °С, 40 °С, 60 °С, 80 °С, 100 °С, 200 °С, ..., 1000 °С, 1100 °С), отчетени от температурни профили, дадени в приложение А на [3] или в друга специализирана литература. Всеки пръстен се разделя и на съответен брой крайни елементи. Действителната форма на изотермата (със заоблени ъгли) се привежда приблизително към равнопощен правоъгълник или квадрат. Изчисляват се параметрите $k_{c,\theta,i} = f_{c,\theta}/f_{c,k}$; $\varepsilon_{c1,\theta,i}$; $\varepsilon_{cu1,\theta,i}$, $\alpha_{ct,i}$ за всеки бетонен пръстен. За армировъчната стомана се въвежда площта $A_{s,j}$ на всеки прът, температурата му $\theta_{s,j}$ и се определят параметрите $k_{sy,\theta,j} = f_{sy,\theta}/f_{yk}$; $k_{sp,\theta,j} = f_{sp,\theta}/f_{yk}$; $k_{sE,\theta,j} = E_{s,\theta}/E_s$; α_{st} . Необходимо е да се въведат разстоянията $z_{s,j}$ и $y_{s,j}$ до центъра на тежестта на всеки краен елемент. Резултатите, изведени от съставената програма, са параметрите на деформацията $\alpha_{1,k,1}$, $\alpha_{2,k,1}$ и $\alpha_{3,k,1}$; механичната деформация $\varepsilon_{c(s),k,\theta,i(j),t}$ и напреженията $\sigma_{c(s),k,\theta,i(j),t}$ във всяко елементче от сечението. Блок-схемата на съставената програма е представена на фиг. 2.



Фиг. 2. Блок-схема

4. Числен пример

Въз основа на съставената програма са изчислени и представени резултатите за квадратно сечение 30/30 cm, изготвено от бетон клас C30/37, армирано с 4N18 от стомана клас B500, с бетонно покритие 3,1 cm (фиг. 3a), подложено на реално пожарно въздействие в жилище, в продължение на $t = 45 \text{ min}$ (фиг. 3б).



Фиг. 3. а) схема на сечение на колона; б) крива „температура-време“

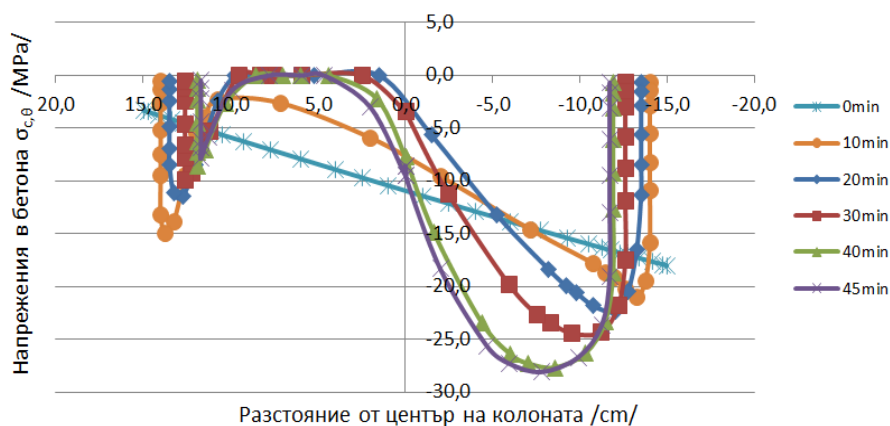
С помощта на специализирания програмен продукт SAFIR, разработен в университета в Лиеж [8], предоставен на автора като безплатна, ограничена, демонстрационна версия на софтуера, е определено местоположението на изотермите във времето.

В табл. 1 са представени параметрите на пожара в жилищното помещение, които са изчислени съгласно приложение А на [2].

Таблица 1. Параметри на пожарно въздействие в жилищно помещение

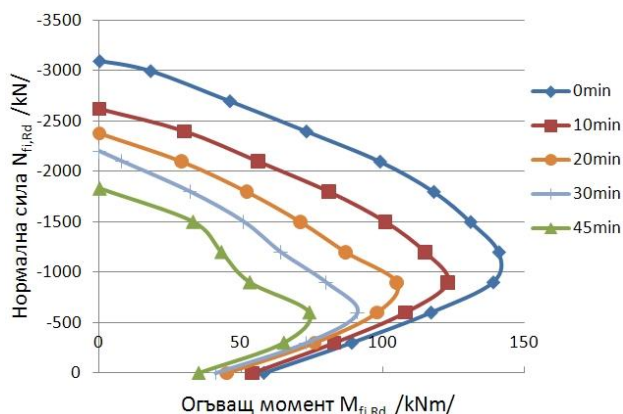
Параметри на помещението и пожарното въздействие	Означение	Мерна единица	Жилищно помещение
Площ на пода на помещението	A_f	m^2	20
Светла височина	-	m	3
Обща площ (стени, таван и под, включително отворите)	A_t	m^2	94
Среднотежестна височина на прозорците по всички стени	h_{eq}	m	1,3
Обща площ на вертикалните отвори по всички стени	A_v	m^2	3,9
Изчислително пожарното натоварване	$q_{f,d}$	MJ/m^2	780
Топлопогълщаемост на цялата конструкция	b	$\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K}$	814,2
Коефициент на отворите	O	$\text{m}^{1/2}$	0,047
Коефициент за време	Γ	-	2,84

На фиг. 4 е показано изменението на напреженията в колоната, в равнината на огъващия момент $M_{fi,Ed}$, при равнинен нецентричен натиск, с развитие на реалното пожарно въздействие.



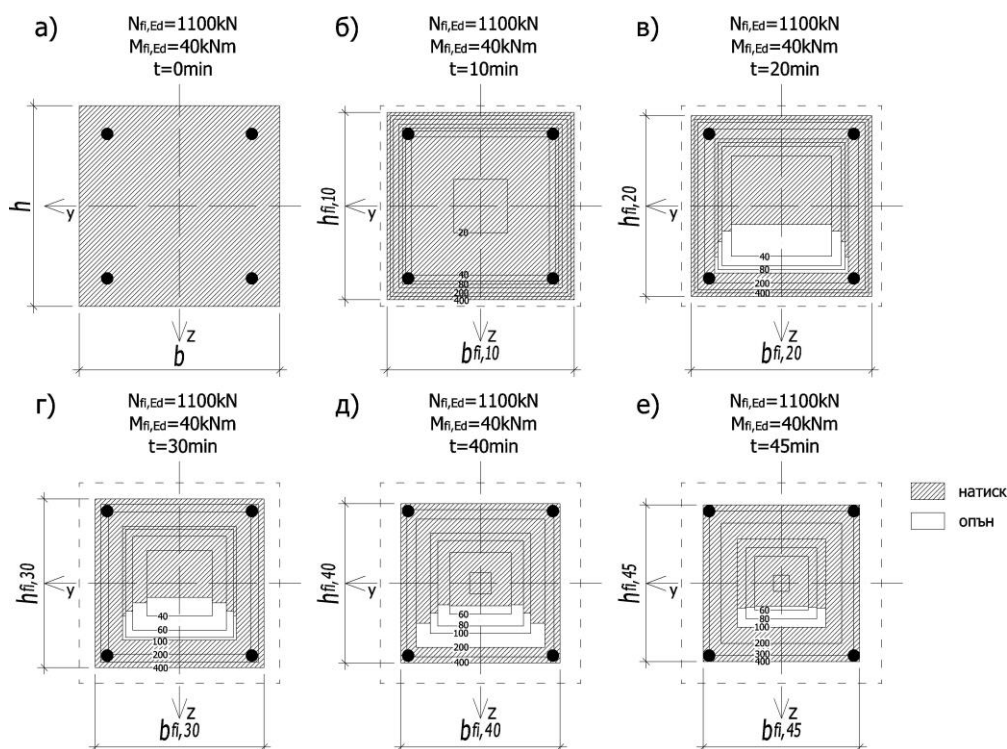
Фиг. 4. Диаграма на изменение на напреженията в бетона $\sigma_{c,\theta}$ във времето, при нормална сила $N_{fi,Ed} = 1100 \text{ kN}$ и огъващ момент $M_{fi,Ed} = 40 \text{ kNm}$, на сечение от нецентрично натоварена квадратна колона

На фиг. 5 е представено намаляването на носещата способност на колоната с развитие на пожарното въздействие.



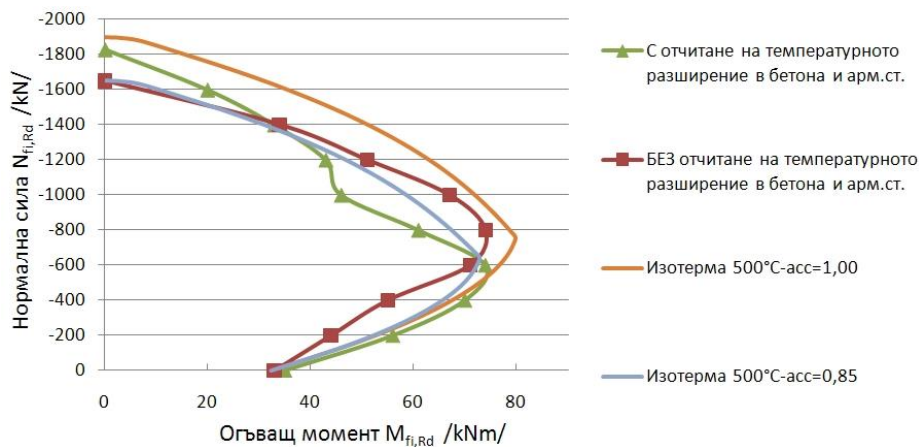
Фиг. 5. Криви на взаимодействие за квадратна колона, подложена на равнинен нецентричен натиск, при реално пожарно въздействие в жилище

На фиг. 6 е изобразено разпределението на опънните и натисковите зони с развитие на пожара. В началото на въздействието цялото сечение на колоната е подложено на натиск и разпределението на деформациите е линейно. След началото на пожарното въздействие, поради значителното температурно разширение на външните пръстени, разпределението на напреженията в сечението вече не е линейно и по-силно нагнетите пръстени са подложени на по-големи напрежения в сравнение с тези, към центъра на колоната. Към 20-тата минута за колоната се образува ексцентрично разположена спрямо центъра на сечението опънна зона. С развитие на пожара опънната зона с криволинейно очертание намалява своя размер. Явлението се дължи на загубата на якост на външните, по-силно нагнети слоеве и поемане на външното въздействие от по-студените пръстени в сърцевината на колоната.



Фиг. 6. Опънна и натискава зона на квадратна колона, подложена на равнинен нецентричен натиск, при развитие на пожарното въздействие

На фиг. 7 е показана носимоспособността на правоъгълно напречно сечение при равнинен нецентричен натиск, изчислена със/без отчитане на създадените температурни разширения в бетона и армивката, чрез създадената методика, както и по опростения метод „Изотерма 500“.



Фиг. 7. Криви на взаимодействие на квадратна колона 30/30 cm, подложена на равнинен нецентричен натиск при реално пожарно въздействие в жилище за $t = 45 \text{ min}$

Методът „Изотерма 500” се основава на хипотезата, че бетонът с температура, по-висока от 500 °С, е компрометиран и неговото влияние не се взема при изчислението на носимоспособността на елемента, а частта от сечението с температура, по-ниска от 500 °С, работи с напрежения и деформации, равни на тези при температура 20 °С. Изчислителната якост на натиск на бетона е $f_{cd,fi} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_{M,fi}$. С развитие на пожара температурата в колоната се увеличава, което води до намаляване на характеристикната граница на провлачване $f_{sy,0,1}$ на армировъчната стомана. Редуцирането ѝ се извършва посредством коефициентите, представени на фиг. 4.2а, крива 3 [3]. Методът е приложим не само при стандартен температурен режим, а и при параметрично пожарно въздействие. В [3] не е указано необходимо ли е прилагане на коефициента α_{cc} за определяне на изчислителната якост на натиск на бетона при високи температури, даден във формула 3.15 на БДС EN 1992-1-1:2005 за нормална температура [4], [5]. Коефициентът има стойност $\alpha_{cc} = 0,85$ при проверка за носимоспособност на нормалните сечения на вертикални или наклонени елементи, изпълнени по монолитен способ и $\alpha_{cc} = 1,00$ при сглобяеми колони. На фигурата се вижда, че носещите способности със и без отчитане на температурното разширение на материалите са различни. При нецентричен натиск с голям и с много малък ексцентрицитет пренебрегването на температурното удължение е в полза на сигурността, но при нецентричен натиск с малък ексцентрицитет – не. Кривата на взаимодействие, определена чрез метода „Изотерма 500”, при коефициент $\alpha_{cc} = 1,00$, обвива другите криви (не е в полза на сигурността), с изключение на елементи, подложени на нецентричен натиск с голям ексцентрицитет, с отчитане на температурните разширения. При приемане на коефициента $\alpha_{cc} = 0,85$ опростеният метод не е в полза на сигурността само при нецентричен натиск с малък ексцентрицитет.

Изводи

Чрез обобщаване на изготвените сравнителни анализи могат да бъдат направени следните изводи:

а) разработените процедури могат да се прилагат за стоманобетонни правоъгълни и кръгли сечения от колони, подложени на центричен, равнинен и кос нецентричен натиск, при стандартно или параметрично пожарно въздействие;

б) опростеният метод „Изотерма 500” не отчита температурното разширение на материалите, респективно действителното преместване (свиване, разширение) и завъртане на стоманобетонното свободно сечение. При отчитане на опорните условия на колоната температурното разширение допринася за увеличаване на началното нормално усилие, както и на възникващите ефекти от втори ред, породени от завъртането на стоманобетонното сечение. Оказаното влияние върху границата на огнеустойчивост по носеща способност е значително;

в) за опростяване на изчисленията, при използване на метода „Изотерма 500”, работните диаграми на бетона и армировъчната стомана се приемат билинейни, докато при разработените програми се използват нелинейни зависимости съгласно БДС EN 1992-1-2:2005;

г) носещата способност, определена чрез метода „Изотерма 500” за правоъгълни колони, при:

- $\alpha_{cc} = 1,00$ обвива кривите, определени чрез разработената процедура, което не е в полза на сигурността;
- $\alpha_{cc} = 0,85$ е в полза на сигурността, с изключение на нецентричен натиск с малък ексцентрицитет;

е) пренебрегването на температурното удължение при правоъгълни колони е в полза на сигурността при сечения, подложени на нецентричен натиск с голям и с много малък ексцентрицитет. При нецентричен натиск с малък ексцентрицитет пренебрегване на деформациите, породени от температурното разширение на материалите, не е в полза на сигурността.

Точното определяне на влиянието на температурното удължение върху носимоспособността на колоната е трудна и комплексна задача, чието ръчно аналитично решение е затруднено от множеството фактори, влияещи върху границата на огнеустойчивост. Отчитането му при определяне на крайното гранично състояние на елемента е препоръчително, поради значителните отклонения на получените резултати при пренебрегването му.

ж) метод „Изотерма 500” и разработените процедури със и без отчитане на температурното разширение на материалите представят идентични резултати при чисто огъване на правоъгълни сечения;

з) носимоспособността на сечения от колони, подложени на центричен натиск, изчислена при отчитане на температурните разширения, е по-голяма от тази при пренебрегването ѝ.

От направените изследвания може да се заключи, че разпределението на деформациите и напреженията в сечението на колоната е затруднено, поради големия брой параметри, влияещи върху напрегнатото и деформирано състояние при пожар: външното натоварване, пожарното въздействие, използваните материали (бетон и армировъчна стомана), количеството, диаметърът и бетонното покритие на вложената надлъжната армировка. При изследване по предложената методика границата на огнеустойчивост на стоманобетонните колони се определя по-точно в сравнение с опростения изчислителен метод „Изотерма 500”.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бартелеми, Б., Крюпа, Ж.* Огнестойкость строительных конструкций. Стройиздат, Москва, 1985.
2. БДС EN 1991-1-2:2004 – Еврокод 1: Въздействия върху строителните конструкции. Част 1-2: Основни въздействия. Въздействия върху конструкции, изложени на пожар; БДС EN 1991-1-2:2004/NA:2010 – Национално приложение.
3. БДС EN 1992-1-2:2005 и БДС EN 1992-1-2:2005/ NA – Еврокод 2: Проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции. Част 1-2: Общи правила. Проектиране на конструкции срещу въздействие от пожар.
4. *Захариева-Георгиева, Б., Нешев, Хр.* Определяне на огнеустойчивостта на стоманобетонни колони чрез опростения изчислителен зонов метод на БДС EN 1992-1-2:2005, XIV Международна научна конференция ВСУ’2014.

5. *Захариева-Георгиева, Б.* Проверка за огнеустойчивост на стоманобетонни колони чрез опростения изчислителен метод „Изотерма 500°C“ на БДС EN 1992-1-2:2005, // сп. “Строителство“, бр. 6, 2012.
6. *Михов, Я.* Температура в конструктивни елементи. София, 2012.
7. FIB, Fire design of concrete structures– structural behaviour and assessment, 2008.
8. Franssen, J., SAFIR, A Thermal/Structural program modelling structures under Fire, Engineering Journal, A.I.S.C., Vol 42, No. 3, 143-158, 2005.

BEARING CAPACITY FOR REINFORCED CONCRETE SECTIONS WITH SYMMETRICAL REINFORCEMENT SUBJECTED TO UNIAXIAL OR BIAXIAL BENDING AND ALL-SIDED FIRE EXPOSURE

H. Neshev¹, Y. Mihov²

***Keywords:** reinforced concrete columns, resistance in a fire situation*

***Research area:** building structures*

ABSTRACT

A procedure is composed to determine the bearing capacity for reinforced concrete sections with symmetrical reinforcement subjected to uniaxial or biaxial bending and all-sided fire exposure.

Comparison between the reported procedure and the simplified calculation model “Isotherm 500 °C” for determining the fire resistance of reinforced concrete columns is made.

¹ Hristian Neshev, Eng. PhD Student, Dept. “Reinforced Concrete Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: neshev_bg@abv.bg

² Yavor Mihov, Prof. Dr. Eng., Dept. “Technical Mechanics”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: mihov_fhe@uacg.bg