

## **РОЗРАХУНКОВІ МЕТОДИ ОЦІНКИ ВОГНЕСТІЙКОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ЄВРОКОДАМИ**

Поклонський В.Г., Фесенко О.А., Байтала Х.З.

ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»

Круковський П.Г.

Інститут технічної теплофізики НАН України

Новак С.В.

Український науково-дослідний інститут цивільного захисту

м. Київ, Україна

**АНОТАЦІЯ:** У статті розглянуто основні положення розрахункових методів визначення вогнестійкості будівельних конструкцій.

**АННОТАЦИЯ:** В статье рассмотрены основные положения расчетных методов определения огнестойкости строительных конструкций.

**ABSTRACT:** This paper considers the general provisions for calculation methods of verification for fire resistance of building constructions.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** межа вогнестійкості, клас вогнестійкості, стандартний температурний режим, теплоізолювальна здатність, несуча здатність.

### **ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО ВОГНЕСТІЙКОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

#### **Нормативні вимоги**

Згідно з ДБН В.1.1-7 [1] (п. 2.10.2) значення межі вогнестійкості будівельних конструкцій визначають шляхом випробувань за ДСТУ Б В.1.1-4 [2], за стандартами на методи випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій конкретних видів або за розрахунковими методами відповідно до стандартів або методик, узгоджених з центральним органом виконавчої влади з питань містобудування, архітектури та житлово-комунального господарства та центральним органом державного пожежного нагляду. Загальні вимоги до розрахункових методів наведено у додатку В ДБН В.1.1-7 [1].

Основна вимога з пожежної безпеки будівельних виробів, будівель та споруд, яка визначена у Технічному регламенті [3], містить положення

стосовно того, що будівельні об'єкти повинні проектуватись і зводитись так, щоб у разі виникнення пожежі [4]:

- несуча здатність будівельних конструкцій зберігалась протягом певного проміжку часу;
- поява і поширення вогню та диму всередині будівельного об'єкта були обмеженими;
- було обмежене поширення пожежі на сусідні будівельні об'єкти;
- люди могли залишити об'єкт або могли бути врятовані іншим способом;
- втрачувалась безпека пожежно-рятувальних підрозділів.

### **Основні положення розрахунку**

Розрахунок будівельних конструкцій на вогнестійкість (окремої конструкції, частини конструктивної системи або конструктивної системи в цілому) враховує такі етапи [5]:

- вибір проектних сценаріїв пожежі;
- визначення відповідних температурних режимів пожежі;
- розрахунок підвищення температури в будівельних конструкціях;
- розрахунок механічної роботи будівельних конструкцій в умовах пожежі.

Розрахунок будівельних конструкцій на вогнестійкість включає прикладання теплових та механічних впливів. Навантаження і впливи на будівлі та споруди внаслідок пожежі класифікують як випадкові (аварійні).

Для оцінки вогнестійкості окремих будівельних конструкцій згідно з положеннями, регламентованими в ДБН В.1.2-7 [4], та вимогами ДБН В.1.1-7 [1] використовують такий підхід, як розгляд сценарію умовної пожежі (номінальний вогневий вплив) – стандартний температурний режим згідно з ДСТУ Б В.1.1-4 [2].

За стандартним температурним режимом залізобетонні конструкції відповідають критеріям настання граничних станів з вогнестійкості  $R$ ,  $E$  та  $I$  таким чином:

- огорожувальні: граничний стан з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності  $E$  та, за необхідності, граничний стан з вогнестійкості за ознакою втрати теплоізолювальної здатності  $I$ ;
- несучі: граничний стан з вогнестійкості за ознакою втрати несучої здатності  $R$ ;
- огорожувальні та несучі: граничні стани з вогнестійкості  $R$ ,  $E$  та, за необхідності,  $I$ .

За стандартним температурним режимом сталеві конструкції відповідають критерію настання граничного стану з вогнестійкості  $R$  таким чином:

– несучі конструкції: граничний стан з вогнестійкості за ознакою втрати несучої здатності R.

Для гарантування встановлених вимог пожежної безпеки в частині вогнестійкості будівельних конструкцій використані основні положення національних стандартів, гармонізованих з Єврокодами [5–7].

Для визначення межі вогнестійкості будівельних конструкцій застосовують метод перевірки – розрахунок (аналіз) окремої конструкції, – що наведений у ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2 і ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2 [6, 7].

Розрахунок конструкцій на вогнестійкість виконують такими методами:

- конструювання згідно з визнаними розрахунковими рішеннями (табличні дані та результати випробувань);
- спрощені методи розрахунку для елементів визначених типів;
- уточнені методи розрахунку для моделювання роботи елементів конструкцій, частин конструкцій або цілої споруди.

Оцінку вогнестійкості окремих залізобетонних конструкцій виконують на підставі табличних даних, що наведені в ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2 [6]. Таблиці розроблені на емпіричній основі і підтверджені досвідом, теоретичною оцінкою та випробуваннями.

Оцінку вогнестійкості окремих сталевих конструкцій виконують спрощеним розрахунковим методом шляхом визначення їх критичної температури згідно з ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2 [7]. Як альтернатива визначенню розрахункової несучої здатності за умови вогневого впливу пожежі перевірку сталевих конструкцій можна виконувати в температурних параметрах шляхом порівняння розрахункових температур із критичною температурою.

Вогнестійкість залізобетонних та сталевих конструкцій, які не задовольняють вимогам табличних даних або критичної температури відповідно, оцінюють уточненими розрахунковими методами відповідно до вимог 4.3 ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2 [6] і ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2 [7].

Уточнені розрахункові методи забезпечують реалістичний розрахунок конструкцій, що зазнають вогневого впливу. Методи базуються на фундаментальній фізичній роботі таким чином, щоб забезпечити прийнятний рівень наближення результатів розрахунку до очікуваної роботи окремої конструкції під час пожежі.

Уточнені розрахункові методи містять окремі розрахункові моделі для визначення:

- підвищення та розподілу температури в конструкціях (теплотехнічний розрахунок);
- механічної поведінки конструктивної системи або будь-якої її частини (статичний розрахунок).

# ТЕПЛОТЕХНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

## Загальні положення

Уточнені методи теплотехнічного розрахунку базуються на загальноновизначених принципах і припущеннях теорії теплопровідності.

Теплова модель, яку застосовують при теплотехнічному розрахунку, враховує такі чинники:

- відповідні теплові впливи згідно з ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2 [5];
- зміну теплофізичних властивостей матеріалу залежно від температури.

Теплотехнічний розрахунок конструкцій виконують для визначеного проміжку часу, не враховуючи фазу загасання пожежі [5]. Цей проміжок часу має відповідати нормованій межі вогнестійкості конструкції.

## Теплові впливи

Теплові впливи задають величиною підсумкового теплового потоку  $\dot{h}_{\text{net}}$  (Вт/м<sup>2</sup>) на поверхню конструкції.

На обігрівних поверхнях цей тепловий потік  $\dot{h}_{\text{net}}$  визначають, враховуючи конвективну  $\dot{h}_{\text{net,c}}$  (Вт/м<sup>2</sup>) та радіаційну  $\dot{h}_{\text{net,r}}$  (Вт/м<sup>2</sup>) його складові, за формулою:

$$\dot{h}_{\text{net}} = \dot{h}_{\text{net,c}} + \dot{h}_{\text{net,r}}. \quad (1)$$

Конвективну складову теплового потоку визначають за формулою:

$$\dot{h}_{\text{net,c}} = \alpha_c \cdot (\Theta_g - \Theta_m), \quad (2)$$

де  $\alpha_c$  – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/(м<sup>2</sup> К);

$\Theta_g$  – температура газового середовища біля конструкції, що зазнає вогневого впливу, °С;

$\Theta_m$  – температура поверхні конструкції, °С.

Радіаційну складову підсумкового теплового потоку визначають за формулою:

$$\dot{h}_{\text{net,r}} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma [(\Theta_r + 273)^4 - (\Theta_m + 273)^4], \quad (3)$$

де  $\Phi = 1$  – кутовий коефіцієнт, див. п. 5.6.1.7 [5];

$\varepsilon_m = 0,7$  – коефіцієнт теплового випромінювання поверхні конструкції для незахищених бетонних поверхонь, незахищених поверхонь металевих конструкцій з вуглецевої сталі, див. п. 5.6.1.6 [5];

$\varepsilon_f = 1,0$  – коефіцієнт теплового випромінювання полум'я, п. 5.6.1.6 [5];

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> К<sup>4</sup>) – стала Стефана-Больцмана;

$\Theta_r$  – ефективна температура випромінювання вогневого середовища, °С;

$\Theta_m$  – температура поверхні конструкції, °С.

Температуру газового середовища для стандартного температурного режиму визначають за формулою:

$$\Theta_g = 20 + 345 \lg(8t + 1), \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4)$$

де  $t$  – час, хв.

Значення коефіцієнту тепловіддачі  $\alpha_c$  для стандартного температурного режиму становить  $\alpha_c = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ .

Якщо конструкція зазнає вогневого впливу з усіх сторін, температура випромінювання  $\Theta_r$  може бути представлена температурою газового середовища  $\Theta_g$  навколо конструкції.

Температуру поверхні  $\Theta_m$  визначають за теплотехнічним розрахунком конструкції.

### Теплофізичні властивості матеріалів

Теплофізичні властивості бетону і сталі за підвищених температур визначають згідно з ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2 і ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2 [6, 7].

Залежність питомої теплоємності і теплопровідності бетону та сталі від температури показано на графіках (рис. 1-4).

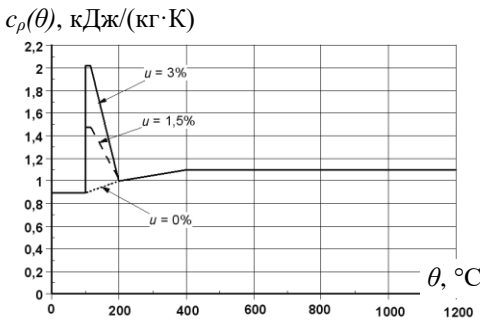
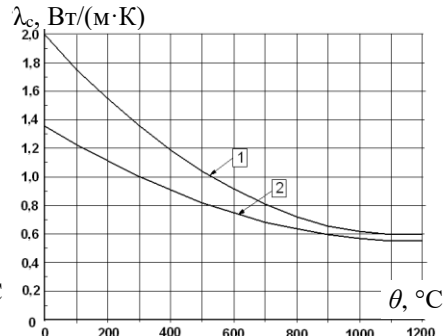


Рис. 1. Питомої теплоємності бетону



1 – верхня межа; 2 – нижня межа  
Рис. 2. Теплопровідності бетону

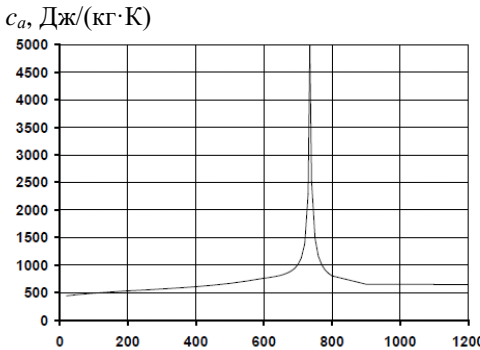


Рис. 3. Питомої теплоємності вуглецевої сталі

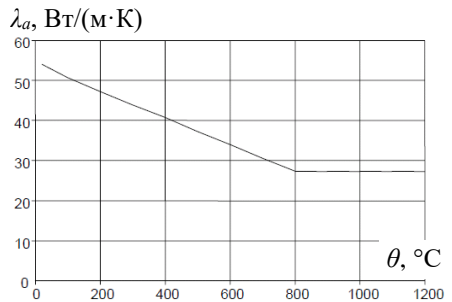


Рис. 4. Теплопровідності вуглецевої сталі

## Розрахунок розподілу температури в конструкціях

Температуру в залізобетонних конструкціях, що зазнають вогневого впливу, визначають за результатами випробувань або розрахунків. Розподіл температури в перерізі конструкції визначають шляхом розв'язання диференційного рівняння нестационарної теплопровідності [8-10]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}[\lambda \text{grad} T] + H = \lambda \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + H, \quad (5)$$

де  $T$  – температура, °C;

$t$  – час, с;

$\lambda$  – теплопровідність, Вт/(м·K);

$c_p$  – питома теплоємність, кДж/(кг·K);

$\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho c_p$  – об'ємна теплоємність, кДж/(м<sup>3</sup>·K);

$H$  – внутрішнє джерело тепла в тілі конструкції.

Розподіл температури у перерізі залізобетонного елемента можна визначати без урахування наявності армування.

Приріст температури сталі  $\Delta\theta_{a,t}$  для розрахункового рівномірного розподілу температури в поперечному перерізі незахищеної сталевій конструкції за проміжок часу  $\Delta t$  визначають за формулою [7]:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net} \Delta t, \quad (6)$$

де  $k_{sh}$  – коригувальний коефіцієнт ефекту затінення;

$A_m/V$  – коефіцієнт перерізу незахищеної сталевій конструкції, м<sup>-1</sup>;

$A_m$  – площа поверхні конструкції, м<sup>2</sup>;

$V$  – об'єм конструкції, м<sup>3</sup>;

$c_a$  – питома теплоємність сталі, Дж/(кг K);

$\dot{h}_{net}$  – розрахункове значення підсумкового теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;

$\Delta t \leq 5$  – проміжок часу, с;

$\rho_a$  – густина сталі, кг/м<sup>3</sup>.

Розрахунок розподілу температури в перерізі конструкції виконують за допомогою програмних комплексів, в яких реалізовано метод скінченних елементів.

## Граничний стан з вогнестійкості за ознакою втрати теплоізолювальної здатності

Згідно з ДСТУ Б В.1.1-4 [2] граничним станом за ознакою втрати теплоізолюючої здатності є перевищення середньої температури на необігрівій поверхні зразка над початковою середньою температурою цієї

поверхні на 140 °С або перевищення температури в довільній точці необігрівної поверхні зразка над початковою температурою в цій точці на 180 °С.

## СТАТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

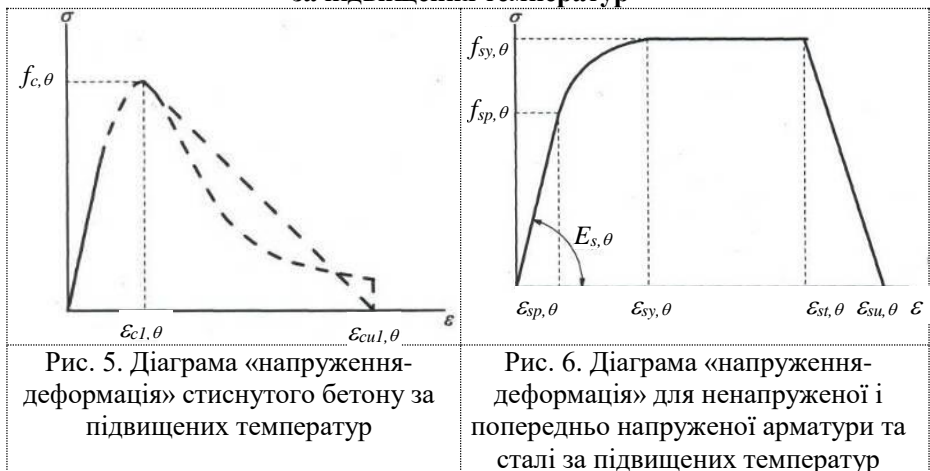
### Загальні положення

Статичний розрахунок межі вогнестійкості будівельних конструкцій за ознакою втрати несучої здатності заснований на граничних станах першої групи, при розрахункових значеннях навантажень з коефіцієнтом надійності, що дорівнює одиниці, і характеристичних значеннях міцності матеріалів. Межа вогнестійкості за ознакою втрати несучої здатності  $R$  вважається забезпеченою, якщо несуча здатність конструкції збережена протягом нормованої тривалості стандартної пожежі. Несучу здатність конструкцій при пожежі визначають з урахуванням деформацій, викликаних їх тепловим розширенням.

Для статичного розрахунку будівельних конструкцій за підвищених температур приймають нелінійні моделі [11].

Статичний розрахунок будівельних конструкцій виконують за допомогою програмних комплексів, в яких реалізовано метод скінченних елементів (МСЕ) для розрахунку, проектування та дослідження будівельних конструкцій, будівель та споруд.

### Міцнісні та деформаційні властивості матеріалів за підвищених температур



Міцність і деформативність бетону, арматури та сталі за підвищених температур приймають згідно з ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2 і ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2 [6, 7]. Залежність «напруження-деформації» для матеріалів за підвищених температур наведено на рис. 5, 6.

В табл. 1 наведені значення коефіцієнтів зниження для діаграми «напруження-деформації» бетону, арматури та сталі за підвищених температур. Значення коефіцієнтів зниження модуля пружності бетону наведені за результатами досліджень Фоміна С.Л. [12].

Таблиця 1

Коефіцієнти умов роботи бетону, арматури і сталі  
за підвищених температур

Температура, °C	Бетон (силікатний)			Арматура (ненапружена)			Сталь (вуглецева)		
	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$E_{cm,\theta}/E_{cm}$	$f_{ck,t(\theta)}/f_{ck,t}$	$f_{sy,\theta}/f_{yk}$	$f_{sp,\theta}/f_{yk}$	$E_{s,\theta}/E_s$	$f_{y,\theta}/f_y$	$f_{p,\theta}/f_y$	$E_{a,\theta}/E_a$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	1,00	1,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,000	1,000	1,000
100	0,95	0,679	1,00	1,00	1,00	1,00	1,000	1,000	1,000
200	0,90	0,493	0,80	1,00	0,81	0,90	1,000	0,807	0,900
300	0,85	0,355	0,60	1,00	0,61	0,80	1,000	0,613	0,800
400	0,75	0,251	0,40	1,00	0,42	0,70	1,000	0,420	0,700
500	0,60	0,156	0,20	0,78	0,36	0,60	0,780	0,360	0,600
600	0,45	0,09	0,00	0,47	0,18	0,31	0,470	0,180	0,310
700	0,30	0,055	-	0,23	0,07	0,13	0,230	0,075	0,130
800	0,15	0,028	-	0,11	0,05	0,09	0,110	0,050	0,090
900	0,08	0,017	-	0,06	0,04	0,07	0,060	0,038	0,068
1000	0,04	0,004	-	0,04	0,02	0,04	0,040	0,025	0,045
1100	0,01	-	-	0,02	0,01	0,02	0,020	0,013	0,023
1200	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000

**Примітка.**  $F_{c,\theta} / f_{ck}$  – коефіцієнт зниження міцності бетону на стиск;  $E_{cm,\theta}/E_{cm}$  – коефіцієнт зниження початкового модуля пружності бетону [12];  $f_{ck,t(\theta)} / f_{ck,t}$  – коефіцієнт зниження міцності бетону на розтяг;  $f_{sy,\theta}/f_{yk}$  – коефіцієнт зниження міцності арматури на розтяг;  $f_{sp,\theta}/f_{yk}$  – коефіцієнт зниження границі пропорційності арматури;  $E_{s,\theta}/E_s$  – коефіцієнт зниження модуля пружності арматури;  $f_{y,\theta} / f_y$  – коефіцієнт зниження розрахункової границі текучості сталі;  $f_{p,\theta}/f_y$  – коефіцієнт зниження границі пропорційності сталі;  $E_{a,\theta}/E_a$  – коефіцієнт зниження модуля пружності сталі.



*Граничним станом за ознакою втрати несучої здатності є обвалення зразка або виникнення граничних деформацій згідно з ДСТУ Б В.1.1-4 [2].*

## **ВИСНОВОК**

Національні стандарти, гармонізовані з Єврокодами, дають змогу розраховувати залізобетонні та сталеві конструкції на вогнестійкість і, таким чином, виконати вимоги пожежної безпеки на стадії проектування.

## **ЛІТЕРАТУРА**

- 1 Пожежна безпека об'єктів будівництва: ДБН В.1.1-7-2002. – [Чинні від 2003-05-01]. – К.: Держбуд України, 2003. – 42 с. – (Будівельні норми України).
- 2 Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги: ДСТУ Б В.1.1-4-98\*. - [Чинний від 1999-03-01]. – К.: Держбуд України, 2005. – III, 19 с. – (Національний стандарт України).
- 3 Технічний регламент будівельних виробів, будівель і споруд, затверджений Постановою Кабінету Міністрів України від 20 грудня 2006р. № 1764.
- 4 Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека: ДБН В.1.2-7-2008.
- 5 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (EN 1991-1-2:2002, IDT): ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010. - [Чинний від 2013-07-01]. – К.: Мінрегіон України, 2012. – VI, 69 с. – (Національний стандарт України).
- 6 Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1992-1-2:2004, IDT): ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012. - [Чинний від 2014-07-01]. – К.: Мінрегіон України, 2013. – VI, 134 с. – (Національний стандарт України).
- 7 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1993-1-2:2005, IDT): ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010. - [Чинний від 2013-07-01]. – К.: Мінрегіон України, 2009. – VIII, 101 с. – (Національний стандарт України).
- 8 Новак С.В. Диапазон изменения предела огнестойкости строительных бетонных конструкций при использовании расчетных методов, приведенных в Еврокоде 2 / Новак С.В. // Науковий вісник УкрНДІПБ, 2014, № 2 (30). – С. 63 – 69.
- 9 Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий / Ройтман В.М. // Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. – 382 с.
- 10 *Fib Bulletin 38: Fire design of concrete structures – materials, structures and modelling*, 2007.

- 11 Єврокод. Основи проектування конструкцій (EN 1990:2002, IDT): ДСТУ-Н Б EN 1990:2008. - [Чинний від 2013-07-01]. – К.: Мінрегіон України, 2012. – VI, 98 с. – (Національний стандарт України).
- 12 Фомин С.Л. Определение модуля упругости тяжелого бетона при высокотемпературном нагреве / Фомин С.Л., Касем Шейхмус, Поклонский В.Г. // Науковий вісник будівництва. - Харьков: Харьковский национальный университет строительства и архитектуры. - №73. – 2013. – С. 427-436.

Стаття надійшла до редакції 12.09.2016 р.