

УДК 614.841.332

*А.И. Ковалев*

## **ОЦЕНКА ОГНЕСТОЙКОСТИ МНОГОПУСТОТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ С ОГНЕЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ МЕТОДОМ**

В статье описана методика оценки огнестойкости многопустотных железобетонных перекрытий с огнезащитными покрытиями. Определены теплофизические характеристики и характеристика огнезащитной способности штукатурного покрытия «Эндотерм 210104».

*Ключевые слова:* огнестойкость, моделирование, характеристика огнезащитной способности, теплофизические характеристики.

*A. Kovaliov*

## **EVALUATION OF FIRE RESISTANCE RATING OF MULTI-HOLLOW FERROCONCRETE FLOORS WITH FIRE-RETARDANT COATINGS BY EXPERIMENT-CALCULATION METHOD**

A method of evaluation of the fire resistance of multi-hollow ferroconcrete floors with fire-retardant coatings is described in the paper. Thermal and physical characteristics as well as those for fire-retardant capability of “Endotherm 210104” plaster coating have been determined.

*Keywords:* fire resistance, modeling, characteristics of the fire-retardant capability, and thermal and physical characteristics.

Огнестойкость строительных конструкций является важной характеристикой, которую необходимо учитывать при проектировании зданий и сооружений. Для обеспечения требуемого предела огнестойкости таких конструкций осуществляется их обработка огнезащитными веществами, а для определения их огнестойкости используют экспериментальный, расчетный и расчетно-экспериментальный методы. В последнее время широкое применение получил более эффективный расчетно-экспериментальный метод, позволяющий по результатам одного или нескольких испытаний на огнестойкость, используя математические модели, оценивать огнестойкость конструкций и определять характеристику огнезащитной способности (ХОС) покрытий, которая в данной работе определяется – как зависимость минимальной толщины огнезащитного покрытия от толщины защитного слоя бетона, необходимой для обеспечения требуемого предела огнестойкости перекрытия [1].

Этот метод получил развитие в работах Ройтмана В.М., Милованова А.Ф., Кошмарова Ю.А., Страхова В.Л., Крутова А.М., Харченко И.А., Демчины Б.Г., Яковлева А.И., Круковского П.Г., Новака С.В., Довбыша А.В., Цвиркуна С.В., Качкара Е.В. и др. при определении огнестойкости различных видов строительных конструкций и их элементов, в частности, огнезащитной способности покрытий металлических конструкций [2], огнестойкости гипсокартонных плит [3], а также при определении необходимой минимальной толщины огнезащитных перегородок для требуемого предела огнестойкости [4].

Но в отмеченных работах не нашли отражения вопросы применения такого метода для оценки огнестойкости многопустотных железобетонных перекрытий, в первую очередь, из-за того, что сложно было учесть особенности теплообмена в полостях таких перекрытий, а также из-за сложности разработки физической и использования математической моделей

теплового состояния таких перекрытий, учитывающих теплообменные процессы в них. Раскрытие и учет этих особенностей, а также разработка наиболее адекватных моделей теплового состояния многопустотных железобетонных перекрытий и обусловило актуальность данной работы.

Особой трудностью при оценке огнестойкости многопустотных железобетонных перекрытий есть учет геометрических особенностей перекрытий, а именно наличие пустот, в которых имеет место конвективно-радиационный теплообмен. В работе влияние этого теплообмена исследовалось с помощью моделирования и сравнения с таким экспериментом в виде испытания на огнестойкость многопустотных железобетонных перекрытий сначала без штукатурного покрытия, а потом со штукатурным покрытием по [5], согласно которого измеряли температуру в печи и на необогреваемой поверхности. Каждый образец устанавливался согласно [5] опиранием с двух сторон на отверстие горизонтальной печи с возможностью огневого воздействия на него с нижней поверхности и нагружался грузами из бетонных блоков. На плиты снизу и по бокам наносился огнезащитный состав "Эндотерм 210104" средней толщиной 37 мм. Испытания проводились при стандартном температурном режиме на протяжении 180 минут. В результате испытаний на огнестойкость было установлено, что предел огнестойкости таких перекрытий составил более 180 мин, а средняя температура на необогреваемой поверхности перекрытия достигла 75 °С, и использовалась в расчетах для определения теплофизических характеристик и характеристики огнезащитной способности покрытия [6].

Для моделирования теплового состояния перекрытия, общий вид которого изображен на рисунке 1, была разработана двухмерная физическая и компьютерная модели в программной среде ANSYS FLUENT, включающая в себя систему уравнений и граничные условия, которые учитывают теплопроводность в покрытии и бетоне и сложный конвективно-радиационный теплообмен в воздушных пустотах. Математическая модель состояла из известных уравнений, неоднократно описанных в литературе и использованных в программе ANSYS FLUENT [1].

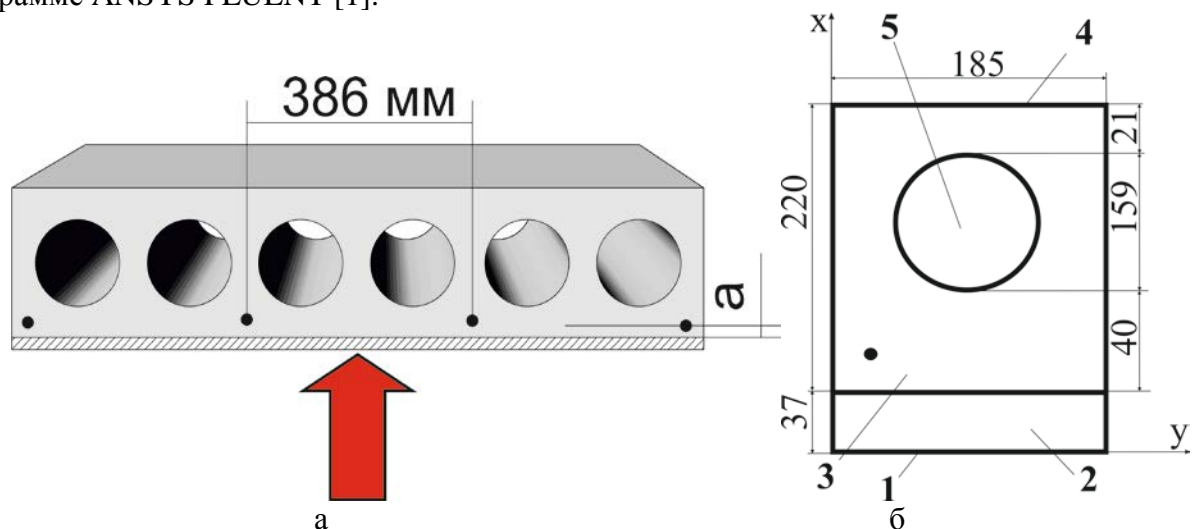


Рисунок 1 – Общий вид многопустотного железобетонного перекрытия ПК 48-12-8т (а) и схема периодической части (фрагмента) плиты с покрытием, используемая в 2D-моделировании (б)

1 – обогреваемая поверхность; 2 – огнезащитное покрытие, 3 – железобетонное перекрытие, 4 – необогреваемая поверхность; 5 – пустота (круглая полость) перекрытия

По результатам испытаний на огнестойкость и расчетов с помощью двухмерной модели был проведен анализ особенностей нагрева железобетонного перекрытия, который показал, что ее применение для определения теплофизических характеристик и характеристики

огнезащитной способности покрытий не представляется возможным из-за большого времени просчета одной прямой задачи (25 минут). Просчетов таких задач может потребоваться сотни. Такие же расчеты в программной среде FRIEND, занимают 1-2 минуты. Поэтому, важным пунктом предлагаемой методики является вывод о необходимости применения одномерных моделей теплопроводности для анализа теплового состояния железобетонных перекрытий с покрытиями в программной среде, например, программы FRIEND.

Для этого была разработана одномерная многослойная математическая модель, эквивалентная двумерной модели теплового состояния многослойного железобетонного перекрытия, с приведенными толщинами этих слоев (рисунок 2).

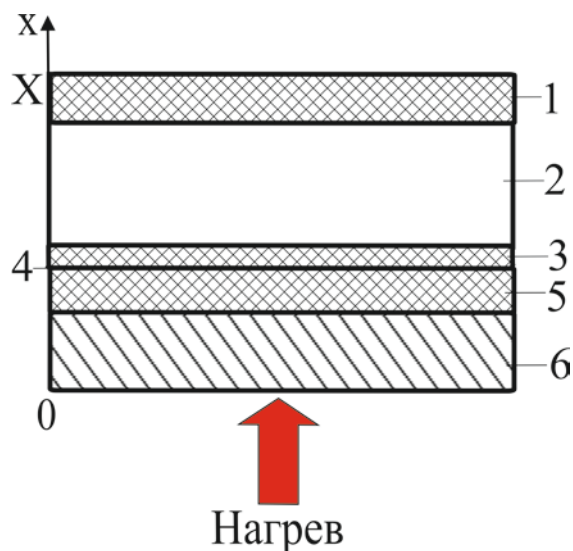


Рисунок 2 – Схема железобетонного перекрытия в одномерной постановке

1 – слой сплошного бетона между необогреваемой поверхностью и слоем с пустотами перекрытия; 2 – слой с пустотами; 3 – слой сплошного бетона между пустотами и арматурой; 4 – слой арматуры; 5 – слой сплошного бетона от арматуры до обогреваемой поверхности; 6 – штукатурное покрытие

Теплофизические характеристики бетона слоев 1, 3 и 5 задавали из [7], а теплофизические характеристики слоя 2 с пустотами искали решением обратных задач теплопроводности (ОЗТ). Приведенные толщины слоев 1, 3 и 5 для бетона рассчитывались, а слой бетона с пустотами 2 выбирался равным диаметру пустот с имеющимся объемом бетона.

Математическая модель (1-5) для одномерной модели теплового состояния перекрытия состояла из уравнений, описывающих теплопроводность в шестислойной плите (рисунок 2), второй слой которой учитывает свободную конвекцию и радиационный теплообмен в полостях посредством эффективной теплопроводности, определяемой решением ОЗТ.

$$c_v(x, T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(x, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (1)$$

$$\lambda_{оп} \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = \alpha^* [T_{Cl}(t) - T(0, t)], \quad (2)$$

$$\alpha^* = \alpha_{Cl} + \frac{C_0 \varepsilon}{T_{Cl}(t) - T(0, t)} \left\{ \left[ \frac{T_{Cl}(t)}{100} \right]^4 - \left[ \frac{T(0, t)}{100} \right]^4 \right\}, \quad (3)$$

$$\lambda_b \frac{\partial T(X, t)}{\partial x} = \alpha^{**} [T(X, t) - T_{c2}] \quad (4)$$

$$\alpha^{**} = \alpha_{c2} + \frac{C_0 \varepsilon}{T(X, t) - T_{c2}(t)} \left\{ \left[ \frac{T(X, t)}{100} \right]^4 - \left[ \frac{T_{c2}(t)}{100} \right]^4 \right\}, \quad \alpha_{c2} = A [T(X, t) - T_{c2}(t)]^{0,33} \quad (5)$$

где  $C_v$  – удельная объемная теплоемкость,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $T$  – температура,  $t$  – время,  $x$  – координата,  $\alpha_{c1}$  – коэффициент теплоотдачи от горячих газов к нагреваемой поверхности огнезащитного покрытия (ОП) или бетона,  $\alpha_{c2}$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности перекрытия с необогреваемой поверхности в воздух,  $C_0$  – излучательная способность абсолютно черного тела ( $C_0 = 5,67$ ),  $\varepsilon$  – коэффициент излучения нагреваемой поверхности ОП или бетона;  $T_{c1}$  – температура горячих газов в печи при испытании;  $T_0$  – начальная температура перекрытия перед испытанием. Коэффициент теплоотдачи от горячих газов в печи к нагреваемой поверхности образца  $\alpha_{c1}$  принимается равным  $25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , степень черноты нагреваемой поверхности  $\varepsilon = 0,7$ . Коэффициент теплоотдачи между необогреваемой поверхностью перекрытия и окружающим воздухом  $\alpha^{**}$  (4)–(5) также учитывает конвективный  $\alpha_{c2}$  и радиационный теплообмен от горизонтальной поверхности ( $A=1,16$ ) в окружающую среду. Многослойность рассматриваемой модели учитывается зависимостями  $C_v$  и  $\lambda$  от координаты.

В результате была разработана методика определения характеристики огнезащитной способности покрытий железобетонных перекрытий с помощью расчетно-экспериментального метода по результатам испытаний на огнестойкость, которая предусматривает:

1. Выбор одномерной математической модели теплового состояния плиты перекрытия с разбивкой плиты на 6 слоев;
2. Использование экстремального метода решения ОЗТ для расчета необходимых параметров модели по результатам испытаний перекрытий на огнестойкость;
3. Задание теплофизических характеристик бетона слоев 1, 3, 5 для моделирования прогрева перекрытия из [7];
4. Определение коэффициента теплопроводности слоя 2 плиты с пустотами решением ОЗТ и использованием данных испытаний на огнестойкость железобетонного перекрытия без покрытия;
5. Определение теплофизических характеристик исследуемого огнезащитного покрытия решением ОЗТ;
6. Определение зависимости толщины покрытия от толщины защитного слоя бетона для различных пределов огнестойкости по критериям достижения арматурой критической температуры ( $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ) или потери теплоизолирующей способности многократным решение прямых задач теплопроводности.

Разработанная методика была применена для определения теплофизических характеристик и характеристики огнезащитной способности штукатурного покрытия «Эндотерм 210104» по результатам испытаний на огнестойкость железобетонных перекрытий с этим огнезащитным покрытием [6]. Согласно п.п. 1, 2 методики был найден эквивалентный коэффициент теплопроводности слоя 2 с пустотами, равный  $3,18 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$ , при котором наблюдалась наибольшая близость расчетных и экспериментальных температур на необогреваемой поверхности перекрытия для образца с наибольшими температурами без огнезащитного покрытия. При этом значение критерия среднеквадратичного отклонения составило  $3,2 \text{ }^\circ\text{C}$  (6).

$$F(P) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (T_{M,j} - T_{Э,j})^2}{m}} \approx \delta, \quad (6)$$

где  $m$  – число экспериментальных измерений, используемых для решения обратной задачи;  $\delta$  – среднеквадратическая ошибка измерения.

Согласно п. 5 методики были определены коэффициент теплопроводности, зависящий от температуры (рисунок 3), и удельная объемная теплоемкость ( $C_v=1,01 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·К)) исследуемого огнезащитного покрытия.

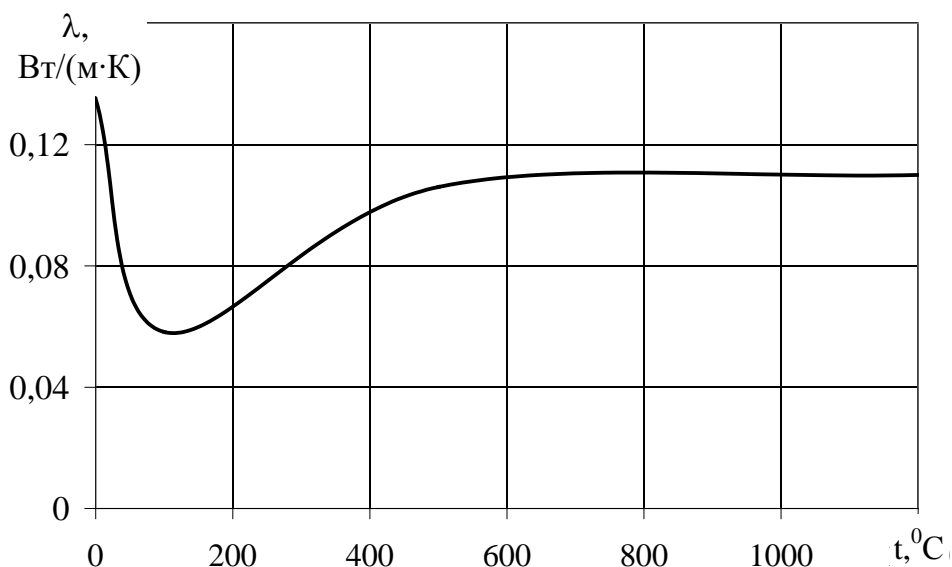


Рисунок 3 – Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности штукатурного покрытия от температуры, найденного решением ОЗТ по данным испытаний на огнестойкость

Как видно из рисунка 3 в диапазоне температур от 0 °С до 100 °С значение коэффициента теплопроводности штукатурного покрытия «Эндотерм 210104» падает и проходит через минимальные экстремальные значения 0,06 Вт/м·К (при температуре 100 °С), что объясняется интенсивными физико-химическими процессами испарения в начальной стадии нагрева, а потом растет в диапазоне температур от 100 °С до 600 °С, что объясняется выгоранием слоя покрытия. При этом критерий среднеквадратичного отклонения составил 1,7 °С (6).

По результатам исследования двух плит перекрытия, для которых проведены испытания на огнестойкость, и согласно п. 6 методики [1], была получена характеристика огнезащитной способности – зависимость толщины штукатурного покрытия «Эндотерм 210104» от толщины защитного слоя бетона перекрытия для различных пределов огнестойкости перекрытия, по признаку достижения арматурой критической температуры 500 °С при заданном в испытании (570 кг/м<sup>2</sup>) уровне нагружения (рисунок 4).

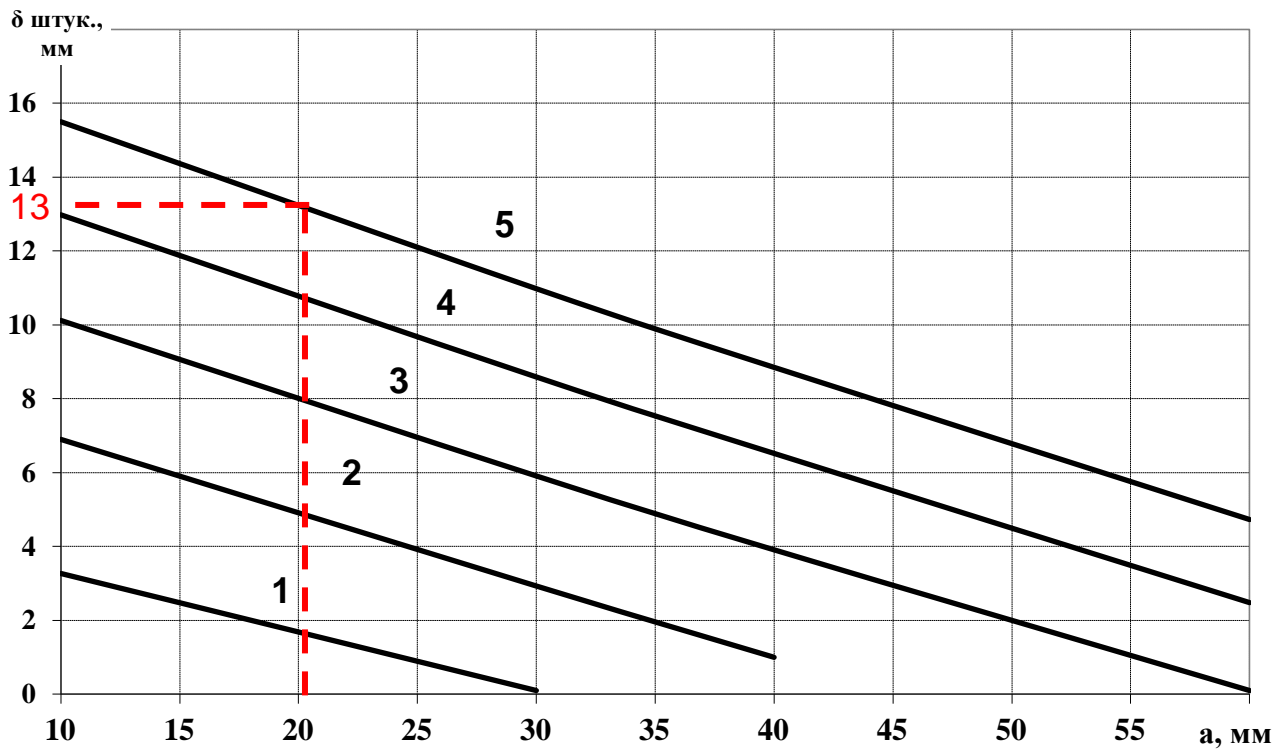


Рисунок 4 – Характеристика огнезащитной способности штукатурного покрытия «Эндотерм 210104» по критерию достижения критической температуры арматуры (500 °С) для пределов огнестойкости

1 – 60 мин; 2 – 90 мин; 3 – 120 мин; 4 – 150 мин; 5 – 180 мин

Как видно из рисунка 4 толщины покрытия 13 мм при толщине защитного слоя бетона 20 мм достаточно для обеспечения требуемого предела огнестойкости такого перекрытия в 180 минут, а не 37 мм, как было при испытаниях на огнестойкость.

Следует отметить, что точность определения характеристики огнезащитной способности оценивается в 16% [1] и может быть выше, если применять дополнительные измерения температур, предложенные в проекте ДСТУ Б В.1.1-XX-20XX «Захист від пожежі. Вогнезахисні покриття для будівельних несучих залізобетонних конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності» не только с необогреваемой поверхности, но и на арматуре, под огнезащитным покрытием и внутри перекрытия.

**Выводы.**

1. Разработана методика, позволяющая с требуемой точностью определять толщину огнезащитного покрытия «Эндотерм 210104» при заданной толщине защитного слоя бетона многопустотного железобетонного перекрытия для обеспечения требуемого предела огнестойкости данной конструкции.

2. Разработанная методика также может применяться при определении характеристики огнезащитной способности покрытий железобетонных перекрытий, которые работают под нагрузкой, а также для определения характеристики огнезащитной способности покрытий монолитных железобетонных конструкций, например, противопожарных перекрытий. При этом методика упрощается, так как не нужно учитывать слой 2 с пустотами (рисунок 2).

Перспективным развитием предложенной методики является дополнительное использование математических моделей напряженно-деформированного состояния перекрытий с применением критерия предельного состояния по признаку потери несущей способности при достижении максимального значения прогиба или скорости нарастания деформации перекрытия.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ковалев А.И. Усовершенствование метода оценки огнезащитной способности покрытий железобетонных перекрытий: дисс. ... кандидата техн. наук : 21.06.02 / Ковалев Андрей Иванович. – К., 2012. – 163 с.
2. Цвіркун С. В. Удосконалення методу визначення вогнезахисної здатності покриттів металевих конструкцій : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 21.06.02 "Пожежна безпека" / С. В. Цвіркун. – Київ, 2006. – 20 с.
3. Довбиш А. В. Обґрунтування умов застосування гіпсокартонних плит як вогнезахисних оздоблювальних матеріалів будівельних конструкцій : дис. ... кандидата техн. наук : 21.06.02 / Довбиш Андрій Володимирович. – К., 2006. – 204 с.
4. Качкар Е. В. Обоснование параметров трехслойных перегородок с минераловатными плитами для зданий и сооружений с учетом их огнестойкости : дис. ... кандидата техн. наук : 21.06.02 / Качкар Евгений Владимирович. – К., 2009. – 157 с.
5. Захист від пожежі. Перекриття та покриття. Метод випробування на вогнестійкість (EN 1365-2:1999, NEQ) : ДСТУ Б В.1.1-20:2007. – [Чинний від 2007-10-26]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2007. – 14 с. – (Національний стандарт України).
6. Круковский П. Г. Методика определения характеристики огнезащитной способности покрытий многопустотных железобетонных плит перекрытий / П. Г. Круковский, А. И. Ковалев // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2011. – № 1 (23). – С. 87–101.
7. EN 1992-1-2: 2004 Eurocode 2 : Design of concrete structures – Part 1–2 : General rules – Structural fire design (Еврокод 2 : Проектування залізобетонних конструкцій – Частина 1–2 : Загальні вимоги. Вогнестійкість).

