

УДК 614.841.41

*С. В. Поздєєв, д. т. н., проф., Ю. А. Отрош, к. т. н., доц.,
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України,
І. В. Федченко, В. В. Демешок,*

ОЦІНКА КЛАСУ ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕНЕСУЧОЇ ПЕРЕГОРОДКИ ЗАЛІЗОБЕ- ТОННИХ МОДУЛІВ СХОВИЩА ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА

Для оцінки вогнестійкості ненесучих залізобетонних стін пропонується методика оцінки класу вогнестійкості цих стін. Ця методика заснована на використанні методу кінцевих різниць та методу кінцевих елементів. Розрахункова оцінка вогнестійкості даних об'єктів є єдиним прийнятним підходом вирішення поставленої задачі.

Ключові слова: аварійні ситуації, пожежа, клас вогнестійкості, вогнестійкість, модулі зберігання, залізобетонна перегородка, табличний метод, метод кінцевих різниць, цілісність, теплопровідність, теплоємність.

Постановка проблеми. У числі аварійних ситуацій, настання яких імовірно на об'єктах зберігання відпрацьованого ядерного палива, має бути розглянутий випадок виникнення та розвитку пожежі у внутрішньому просторі залізобетонних блоків. Такий стан зумовлюється надзвичайно високою відповідальністю даних об'єктів. Потрібно зазначити, що об'єкт не може бути класифікований з огляду на чинну нормативну базу України щодо його ступеня вогнестійкості, зважаючи на відсутність необхідності забезпечення евакуації людей, гарантування безпеки рятувальних підрозділів з врахуванням ризиків обвалення конструкцій. Основною задачею пожежної безпеки будівельних конструкцій об'єкту, рішення якої залежить від вогнестійкості конструкцій, є забезпечення їх живучості на час, необхідний для локалізації та ліквідації імовірної пожежі. Для цього достатньо забезпечити вогнестійкість за I ступенем вогнестійкості згідно із класифікацією класів вогнестійкості будівельних конструкцій за ДБН В. 1.1-7-2002. Дані вимоги встановлені згідно із п 4.1 Індивідуальних технічних вимог з пожежної безпеки ISF/UKR/102425-ИТТ інв. № 42767 «Проект. Завершення будівництва. Сухого сховища відпрацьованого ядерного палива (СВЯП-2)».

Для оцінки вогнестійкості конструкцій пропонується розроблена і відповідним чином затверджена методика оцінки класу вогнестійкості будівельних конструкцій залізобетонних модулів зберігання сховища відпрацьованого ядерного палива СВЯП-2. Згідно із цією методикою визначені елементи, гарантування відповідності яких встановленим вимогам щодо вогнестійкості автоматично забезпечує відповідність інших елементів із менш небезпечним сполученням навантажень, теплового впливу пожежі і геометричної конфігурації. До таких елементів належать зовнішня залізобетонна несуча стіна, зовнішня залізобетонна самонесуча стіна, залізобетонна ненесуча стіна (перегородка) та плита залізобетонного перекриття.

З огляду на унікальність, масивність та вартість залізобетонних конструкцій об'єкту, їх вогневі випробування стіни є неефективним, оскільки розуміють виготовлення по два зразки із дотриманням всіх технологій. Зразки досліджуваних елементів є негабаритними і не можуть бути випробувані на обладнанні що наявне у випробувальних центрах України. Це означає, що розрахункова оцінка вогнестійкості даної структури є єдиним прийнятним підходом щодо вирішення поставленої задачі.

Розроблена методика базується на стандартах, гармонізованих із відповідною методичною та нормативною базою Об'єднаної Європи, а також узгоджується із результатами досліджень вітчизняних та закордонних авторів, які апробовані, обговорені та визнані науковою спільнотою і входять у основну базу літературних посилань та цитування фахівцями даної

галузі. В методиці передбачено застосування декілька можливих підходів, згідно з якими обґрунтовані і детально пророблені відповідні ним послідовності розрахункових процедур.

Постановка задачі та її розв'язання. Мета роботи – розвиток методології застосування методів розрахунків меж вогнестійкості, заснованих на використанні методу кінцевих елементів та методу кінцевих різниць, на прикладі оцінки вогнестійкості несучої залізобетонної перегородки, забезпечення пожежної безпеки залізобетонних модулів зберігання сховища відпрацьованого ядерного палива СВЯП-2.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Для обмеження простору комірки, де зберігається контейнер із відпрацьованим ядерним паливом, застосовуються внутрішні перегородки. Дані перегородки класифікуються як несучі залізобетонні стіни із відповідними вимогами до них. На рис. 1 поданий зовнішній вигляд перегородки.

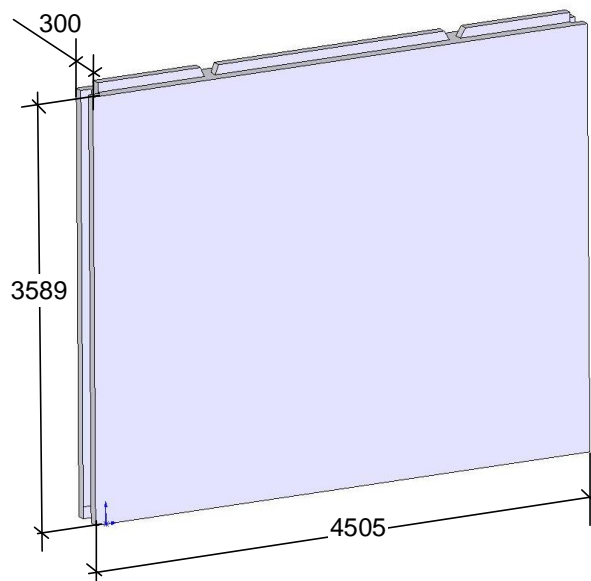


Рисунок 1 – Зовнішній вигляд несучої залізобетонної перегородки.

Залізобетонна перегородка не сприймає навантаження і встановлюється у конструкції блоку за допомогою пазів, куди заходять шпонки основи та шпонкою на верхньому краї що заходить у пази на плитах.

На рис. 2 показаний поперечний переріз перегородки та схема її армування.

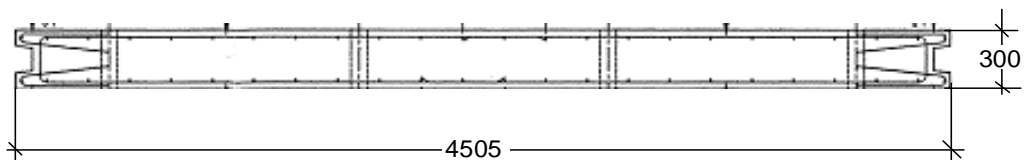


Рисунок 2 – Геометрична конфігурація перерізу та схема розташування арматури несучої залізобетонної перегородки.

Відповідно до Індивідуальних технічних вимог з пожежної безпеки ISF/UKR/102425-ИТТ інв. № 42767 «Проект. Завершення будівництва. Сухого сховища відпрацьованого ядерного палива (СВЯП-2) дана стіна повинна відповідати вимогам до подібних стін за I ступенем вогнестійкості згідно із ДБН В 1.1.7 – 2002, тобто має відповідати класу вогнестійкості EI 30.

Досліджувана стіна не має навантаження і не є несучою. Дана стіна встановлюється в огорожувальні конструкції за допомогою шпонок у відповідні пази (рис. 1, рис. 2), стіна є суцільною, а її поверхні не мають шарів штукатурки.

При розгляді теплової дії пожежі на стіну згідно із конструктивними схемами приходимо до висновку, що її можна розглядати за схемою одностороннього теплового впливу на нескінченну пластину із певною товщиною

Для вивчення розподілень температури по перерізу стіни використана розрахункова методика, заснована на розв'язку рівняння теплопровідності із граничними умовами (ГУ) III роду рекомендована чинними стандартами України і детально описана у роботах [1 – 4, 6]. Крайова задача при цьому була поставлена з використанням розрахункової схеми, яка подана на рис. 3.

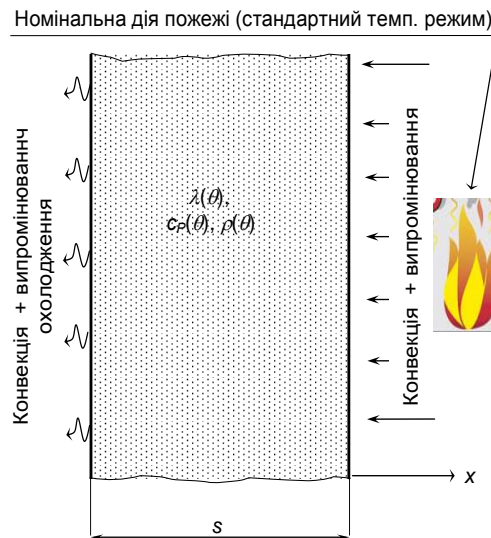


Рисунок 3 – Розрахункова схема при односторонньому нагріву внутрішньої стіни.

Згідно із розробленою методикою для визначення температурного розподілення у перерізі стіни використаний метод кінцевих різниць. Для його реалізації була складена розрахункова схема, подана на рис. 4.

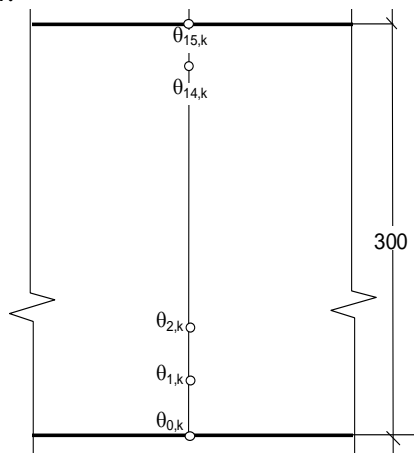


Рисунок 4 – Кінцево-різницева схема для розв'язку задачі теплопровідності при визначенні температур у перерізі внутрішньої несучої стіни.

Згідно із рекомендаціями стандартів, чинних в Україні, для розрахунку використовуємо стандартний температурний режим пожежі, який визначається формулою:

$$\theta_p(t) = 345 \cdot \lg(8t / 60 + 1) + \theta_0, \quad (1)$$

де: t – час стандартного вогневого випробування, с;

θ_0 – початкова температура середовища, °С; $\theta_0 \approx 20^\circ\text{C}$;

$\theta_p(t)$ – температура у вогневій камері установки для визначення меж вогнестійкості конструкцій в залежності від часу t стандартного випробування.

Для розв'язку рівняння теплопровідності потрібно задати температурні залежності теплофізичних характеристик матеріалів зовнішньої стіни. В табл. 1 подані теплофізичні характеристики бетону внутрішньої несучої стіни.

Таблиця 1 – Теплофізичні характеристики матеріалів внутрішньої несучої стіни

Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda(\theta)$, Вт/(м·°С)	Об'ємна питома теплоємність, $c_p(\theta) \cdot \rho$, Дж/(м ³ ·°С)	Густина, кг/м ³
Важкий бетон на силікатному заповнювачі ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012		
$2 - 0,2451 \frac{\theta}{100} + 0,0107 \left(\frac{\theta}{100} \right)^2$	900 ρ при $20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C}$, (900+($\theta - 100$)) ρ при $100^\circ\text{C} < \theta \leq 200^\circ\text{C}$, (1000+0,5($\theta - 100$)) ρ при $200^\circ\text{C} < \theta \leq 400^\circ\text{C}$, 1100 ρ при $400^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}$	2300

На рис. 5 подані графіки температурних залежностей теплофізичних характеристик бетону.

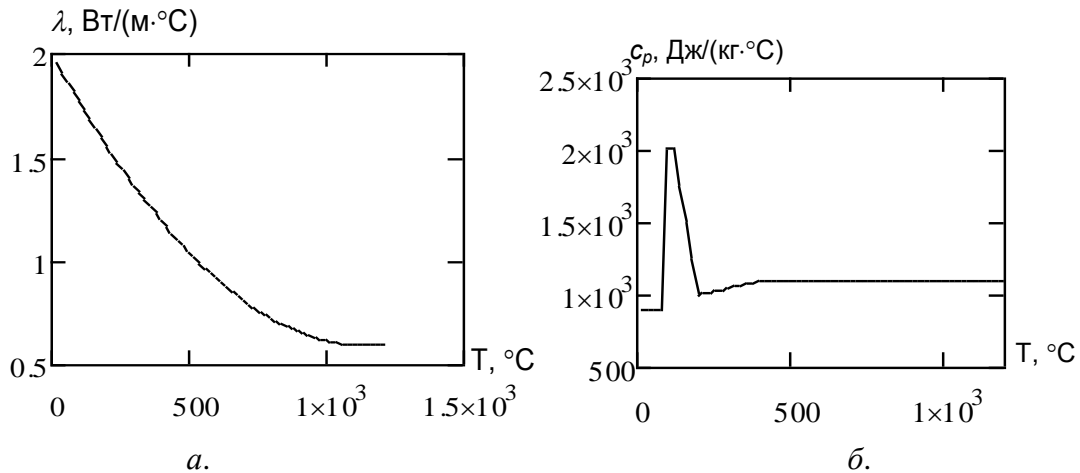


Рисунок 5 – Теплофізичні характеристики важкого бетону на гранітному заповнювачі: a – коефіцієнт теплопровідності; b – питома теплоємність.

Для розрахунку також необхідно задати початкову температуру розрахункової області та параметри граничних умов. Параметри граничних умов наведені у табл. 2.

Для розв'язку задачі теплопровідності за методом кінцевих різниць необхідно задати початковими даними. Згідно із розробленою нами методикою нами були встановлені такі початкові дані:

- початкова температура $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$;
- просторовий крок інтегрування $\Delta h \sim 0.025$ м;
- часовий крок інтегрування – $\Delta t = 60$ с.

Таблиця 2 – Параметри граничних умов для внутрішньої несучої стіни

Параметр	Позн.	Од.вим.	Вел.	Посилання
Обігрівна сторона				
Конвективна складова коефіцієнту теплообміну	α_c	Вт/(м ² °C)	25	ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2012
Ступінь чорноти	ε		0,7	ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012
Необігрівна сторона				
Коефіцієнт теплообміну	α	Вт/(м ² °C)	9	ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2012

Розрахунок реалізований у програмному середовищі табличного процесору Microsoft Excel 2003.

На рис. 6 представлені результати у вигляді графіків температури нагріву контрольних точок у залежності від часу пожежі.

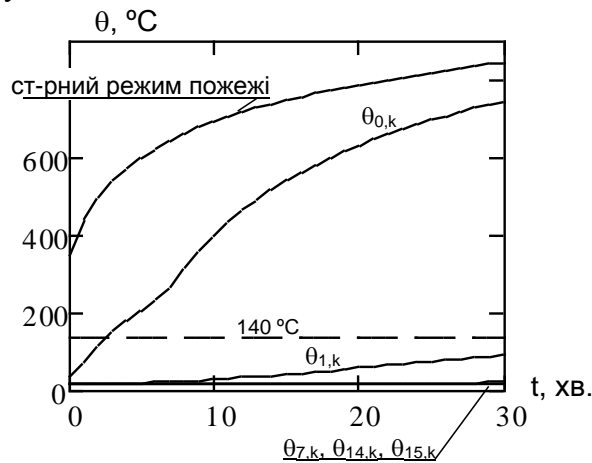


Рисунок 6 – Часові залежності прогріву внутрішніх шарів внутрішньої несучої стіни.

На рис. 7 показані розподіли температури по перерізу стіни у різні моменти часу температурного впливу пожежі. Для порівняння також наведені результати розрахунку для більшого інтервалу часу за той, що вимагається.

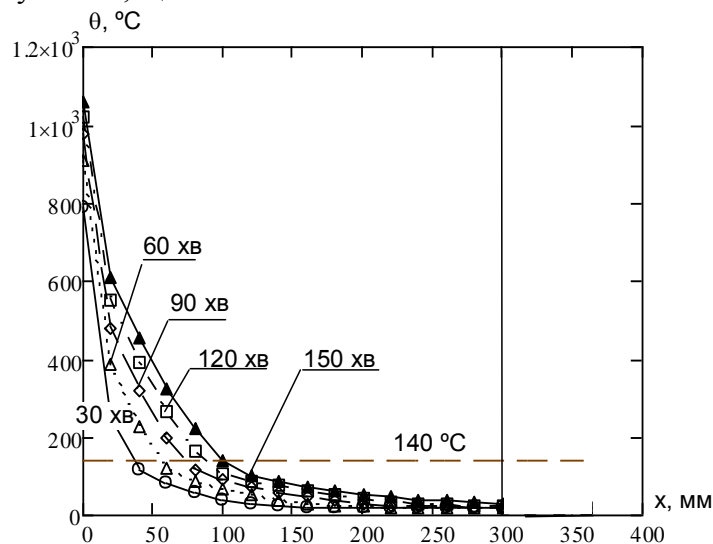


Рисунок 7 – Температурні розподіли по перерізу внутрішньої несучої стіни у різні моменти часу розвитку пожежі.

Використовуючи результати теплотехнічного розрахунку, визначаємо, що за контрольний термін часу протягом 30 хв граничний стан втрати теплоізолювальної здатності не несучої внутрішньої стіни не настає. Отже за теплоізолювальною здатністю клас вогнестійкості не несучої внутрішньої стіни є не меншим за І 30, що відповідає встановленим вимогам.

Для забезпечення цілісності залізобетонної не несучої стіни застосовується методика, визначена у джерелах [1, 2]. Згідно із положеннями в даних джерелах цілісність контролюється за спеціальним коефіцієнтом, що визначається за формулою:

$$F = b_c \alpha_{ct} E_{s,\theta} \rho_c / K_1 \lambda_n, \quad (2)$$

де b_c - коефіцієнт пропорційності, рівний $1,16 \cdot 10^{-2} \text{Вт} \cdot \text{м}^{3/2}$;

$\alpha_{ct}(250 \text{ }^\circ\text{C}) = 9 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ коефіцієнт температурного розширення бетону [ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012];

$E_{c,\theta} = 1,2 \cdot 10^4$ МПа початковий модуль пружності бетону [ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012];

$\rho_c = 2150 \text{ кг/м}^3$ – густина бетону у сухому стані, кг/м^3 , що дорівнює густині бетону природної вологості за відніманням випареної води у кількості 150 кг/м^3 ;

$K_1 = 0,47 \text{ МН} \cdot \text{м}^{3/2}$ - коефіцієнт псевдоінтенсивності напружень у бетоні [1, 2];

$\lambda_n = 1,5 \text{ Вт} \cdot \text{м} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$ – коефіцієнт теплопровідності бетону при температурі $250 \text{ }^\circ\text{C}$ [ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012].

Використовуючи початкові дані, які подані вище отримуємо параметр F .

$$F = \frac{1,16 \cdot 10^{-2} \cdot 9 \cdot 10^{-6} \cdot 1,2 \cdot 10^4 \cdot 2150}{0,47 \cdot 1,5} = 3,821 \leq 4$$

Параметр менший за 4 це означає, що граничний стан втрати цілісності не настає.

Для перевірки визначеного нами класу вогнестійкості застосовується табличний метод відповідно до п. 5.4.1 ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 Eurocode2. Результати подані у табл. 2.4.

Таблиця 3 – Мінімальні розміри та осьові відстані для не несучих залізобетонних стін

Стандартна вогнестійкість	Мінімальна товщина стіни h_s (мм)
EI 30	60
EI 60	80
Необхідний клас вогнестійкості	Реальна товщина стіни h_s (мм)
EI 30	300

Дані табл. 3 підтверджують визначений нами клас вогнестійкості досліджуваної стіни.

Висновки:

1. Аналізуючи дані, подані на графіках рис. 6 та рис. 7, можна помітити, що температура на необігрівній поверхні стіни протягом контрольного часу 30 хв не досягає значення $140 \text{ }^\circ\text{C}$. Це дає змогу стверджувати що клас вогнестійкості внутрішньої не несучої стіни є не меншим за EI 30, дана стіна відповідає вимогам, що встановлені у Індивідуальних технічних вимогах з пожежної безпеки ISF/UKR/102425-ИТТ інв. № 42767 «Проект. Завершення будівництва. Сухого сховища відпрацьованого ядерного палива (СВЯП-2).

2. Розрахунок, виконаний за даною методикою покрокового аналізу дозволив отримати результати, що були перевірені за допомогою альтернативних розрахункових методів, що взяті з тих же рекомендованих відповідним стандартом методів.

3. Для відповідності встановленим вимогам до залізобетонних конструкцій блоків для зберігання відпрацьованого ядерного палива СВЯП-2 виконані розрахунки щодо оцінки класу вогнестійкості визначених елементів конструкцій. Методики розрахунків відповідають методикам, встановленим у чинному стандарті України, аналогічному відповідному стандарту Євросоюзу Eurocode 2 ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 з використанням сучасного науково обґрунтованого підходу.

4. За результатами розрахунку встановлено, що ненесучі залізобетонні перегородки блоків для зберігання відпрацьованого ядерного палива СВЯП-2 повністю відповідають вимогам щодо їх вогнестійкості, які встановлені у Індивідуальних технічних вимогах з пожежної безпеки ISF/UKR/102425-ИГТ інв. № 42767 «Проект. Завершення будівництва. Сухого сховища відпрацьованого ядерного палива (СВЯП-2).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Жуков В.В. Взрывообразное разрушение бетона / Жуков В.В., Гуляева В.Ф., Сорокин А.Н. // Огнестойкость строительных конструкций. – Вып. 4. – 1976. – С. 42–57.
2. Правила по обеспечению огнестойкости и огнестойкости железобетонных конструкций. СТО 36554501-006-2006 – [Введен в действие 1996-01-01] – М.: Стройиздат, 2006. – 77 с. – (Национальный стандарт РФ).
3. Бартелеми Б. Огнестойкость строительных конструкций / Бартелеми Б., Крюппа Ж. – М.: Стройиздат, 1985. – 216 с.
4. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1988. – 144 с.
5. Вогнезахисні покриття для будівельних несучих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності. (ENV 13381-4:2002) ДСТУ Б В.1.1-17:2007. [Чинний від 2007-01-01.] – К.: Укрархбудінформ, 2007. – 62 с – (Національний стандарт України).
6. Леннон Т., Мур Д.Б., Ван Ю.К., Бейли К.Г. Руководство для проектировщиков к EN 1991-1-2:2002, EN 1992-1-2:2002, EN 1993-1-2:2002 и EN 1994-1-2:2002 : справочник по проектированию противопожарной защиты стальных, сталежелезобетонных и бетонных конструкций зданий и сооружений в соответствии с Еврокодами : пер. с англ. / Т. Леннон и др.; ред. Серии Х. Гульванесян; М-во образования и науки Росс. Федерации, ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т» ; науч ред. пер. В.М. Ройтман, И.А. Кириллов, А.И. Плотников; 2-е изд., Москва – МГСУ, 2013. – 196 с.
7. Промышленные здания. Каталог систем и материалов. Пособие для проектировщиков при использовании изоляционных систем «ROCKWOOL». Москва. – 2010. – 42 с.
8. Франчук А.У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов, М.: НИИ строительной физики, 1969 - 142 с.