

РОЗРАХУНОК ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ ЗА ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ ВУГЛЕВОДНЕВОЇ ПОЖЕЖІ

Олег ФЕСЕНКО¹, Віра КОЛЯКОВА², Леонід СКОРУК³, Любов АНДРІЙЧЕНКО⁴

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітряних Сил, Київ, Україна, 03037

¹fesenko.oa@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-8154-2239>

²koliakova.vm@knuba.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0001-6879-8520>

³skoruk.lm@knuba.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0002-7362-1348>

⁴andriichenko_lo-2022@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0005-6274-494X>

Анотація. Об'єкти критичної інфраструктури України, зокрема об'єкти енергетики, часто стають ціллю терористичних атак військ Російської федерації. Такі об'єкти потребують улаштування інженерного захисту будівель, споруд та дахів. Руйнування та пошкодження будівельних конструкцій внаслідок вибухового впливу можуть супроводжуватися виникненням пожежі.

Пожежі на об'єктах критичної інфраструктури характеризуватися високою інтенсивністю. Температурний режим вуглеводневої пожежі відзначається стрімким підвищенням температури до 1100 °C у перші 5 хв після займання.

Розрахунок на вогнестійкість за температурним режимом вуглеводневої пожежі можливо виконувати тільки за допомогою уточнених методів. Табличні дані і спрощені методи можна застосувати лише для стандартного температурного режиму.

У цій статті наведено результати розрахунку монолітних залізобетонних стін, колон і плит на вогнестійкість за температурним режимом вуглеводневої пожежі. Конструкції для розрахунку на вогнестійкість були прийняті як такі, що є характерними для захисних споруд навколо об'єктів критичної енергетичної інфраструктури.

Розрахунок залізобетонних конструкцій на вогнестійкість за температурним режимом вуглеводневої пожежі було виконано із засто-



Олег ФЕСЕНКО

доцент кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій,
к.т.н., доцент



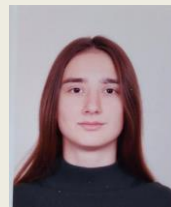
Віра КОЛЯКОВА

доцент кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій,
к.т.н., доцент



Леонід СКОРУК

доцент кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій,
к.т.н., доцент



Любов АНДРІЙЧЕНКО

здобувачка ступеню вищої освіти бакалавр

суванням програмного комплексу ЛІРА-САПР Теплофізичний розрахунок конструкцій було виконано за умов, що моделюють вогневий вплив пожежі, яка розвивається за температурним режимом вуглеводневої пожежі: на стіни і плити – з однієї сторони, на колони – з чотирьох сторін. Тривалість вогневого впливу пожежі була

прийнята відносно до нормованого класу вогнестійкості конструкцій.

Залишкову несучу здатність залізобетонних конструкцій після вогневого впливу за температурним режимом вуглеводневої пожежі було обчислено для їх приведеного перерізу. Міцність бетону та арматури конструкцій було прийнято з урахуванням їх зниження внаслідок вогневого впливу за температурним режимом вуглеводневої пожежі.

Ключові слова: вогнестійкість; об'єкти критичної енергетичної інфраструктури; повномасштабна військова агресія РФ проти України; температурний режим вуглеводневої пожежі; залізобетонні конструкції.

ВСТУП

Об'єкти критичної інфраструктури, зокрема об'єкти енергетики, часто стають ціллю терористичних атак для армії російської федерації. Згідно з бюлетнем Моніторингової місії ООН з прав людини в Україні за вересень 2024 року [1] у період з 22 березня до 31 серпня 2024 року війська Російської Федерації здійснили дев'ять хвиль далекобійних і добре скоординованих атак на енергетичну інфраструктуру України. Внаслідок цих атак було пошкоджено або зруйновано багато об'єктів генерації, передачі та розподілу електроенергії. Ці удари завдали шкоди цивільному населенню та ключовим системам критичної інфраструктури: електро- і водопостачанню, каналізації, опаленню, охороні здоров'я, освіті та економіці країни загалом.

За даними звіту Київської школи економіки [2] станом на травень 2024 року прямі збитки сектору електроенергетики внаслідок повномасштабної агресії РФ становили \$11,4 млрд.

За даними ресурсу Bellingcat [3] станом на 05 грудня 2024 року було зафіксовано понад 60 атак армії РФ на індустріальні, у т.ч. інфраструктурні та енергетичні об'єкти в Україні.

Шляхи для підвищення ефективності систем фізичного захисту об'єктів критичної інфраструктури від терористичних актів були запропоновані авторами публікації [4]

у 2021 році. Повномасштабна військова агресія російської федерації проти України створила нові виклики і загрози для об'єктів критичної інфраструктури, які стали потребувати улаштування інженерного захисту будівель, споруд та дахів. Різноманітні варіанти такого захисту були запропоновані у спеціально розроблених Методичних вказівках [5].

Рішення Ради національної безпеки і оборони України від 17 жовтня 2023 року зобов'язало забезпечити виконання робіт та заходів із належного інженерного та фізичного захисту (зокрема, щодо проти-дронного захисту, систем оповіщення, укриттів для персоналу, розміщення запасних / дублювальних пунктів управління у захищених місцях) об'єктів критичної інфраструктури, та їх відновлення у разі пошкодження [6].

Захист будівель і споруд об'єктів критичної енергетичної інфраструктури потребує розробки методик розрахунку та обґрунтування вимог до інженерного захисту від БпЛА типу баражуючий боєприпас [7, 8] та впливу вибухової ударної хвилі [9].

Руйнування та пошкодження будівельних конструкцій внаслідок вибухового впливу можуть супроводжуватися виникненням пожежі. Особливістю вогневого впливу пожежі на об'єктах критичної енергетичної інфраструктури, на відміну від об'єктів масового будівництва, є висока інтенсивність, яку може охарактеризувати температурний режим вуглеводневої пожежі.

Пожежна безпека будівель і споруд, зокрема в частині забезпечення вогнестійкості захисних будівельних конструкцій, є важливим елементом інженерного захисту об'єктів критичної енергетичної інфраструктури від наслідків прямого ураження або вибухової ударної хвилі.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Підвищення пожежної небезпеки об'єктів критичної інфраструктури є глобальною проблемою, особливо в умовах посилення терористичних загроз та воєнних дій, через

застосуванням тяжкої та вибухової зброї [10].

Автори публікації [10] наголошували на негайній необхідності особливих заходів безпеки України, як для вугільних, оборонних та інших критично важливих об'єктів у зоні проведення АТО (станом на 2018 рік), так і для стратегічних об'єктів та інфраструктури по всій території країни.

Пожежі на об'єктах критичної інфраструктури, у т.ч. промислових і енергетичних, можуть характеризуватися високою інтенсивністю, зокрема через наявність вогнебезпечних і горючих речовин, таких як паливно-мастильні матеріали. Для підтвердження вогнестійкості будівельних конструкцій, що зазнають більш інтенсивного впливу, особливо за більш високої швидкості наростання температури, застосовують температурний режим вуглеводневої пожежі [11-14], що визначається залежністю:

$$T=1080 [1-0,325 e^{-0,167 t}-0,675 e^{-2,5 t}]+20, \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

де T – температура газового середовища навколо конструкції, $^{\circ}\text{C}$,
 t – час, хв.

Температурний режим вуглеводневої пожежі характеризується стрімким підвищенням температури до $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ у перші 5 хв після займання й тепловим потоком інтенсивністю $150\text{-}200 \text{ кВт/м}^2$ [10]. Крива вуглеводневого режиму пожежі також представляє можливий сценарій пожежі у паркінгах, тунелях і на нафто-хімічних підприємствах [15].

Для моделі температурного режиму вуглеводневої пожежі використовують відповідний коефіцієнт конвекційного теплообміну $\alpha_c=50 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, відмінний від стандартного температурного режиму пожежі $\alpha_c=25 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ [11-13]. Крива температурного режиму вуглеводневої пожежі, порівняно з кривою стандартного температурного режиму, наведена на рис. 1.

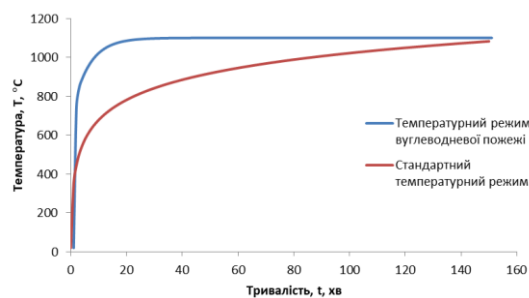


Рис. 1. Температурні режими пожежі: вуглеводневий, стандартний

Fig. 1. Fire curves: hydrocarbon, standard

Для розрахунку на вогнестійкість за температурним режимом вуглеводневої пожежі застосовують ті самі граничні стани (R, E, I), як і для стандартного температурного режиму, але посилання на цю криву ідентифікується літерами «НС» [16].

Наразі бракує результатів досліджень про вогнестійкість залізобетонних конструкцій за температурним режимом вуглеводневої пожежі [15]. Результати деяких таких досліджень стосувалися сталевих і сталезалізобетонних конструкцій мостів, які зазнають вогневого впливу за температурним режимом вуглеводневої пожежі [17, 18]. Таким чином, характеристики залізобетонних конструкцій за температурним режимом вуглеводневої пожежі недостатньо кількісно та якісно визначені та встановлені [14].

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою цього дослідження є оцінка вогнестійкості залізобетонних конструкцій, що зазнають вогневого впливу за температурним режимом вуглеводневої пожежі.

Для досягнення поставленої мети було вирішено такі завдання:

1. Проаналізувати вимоги до вогнестійкості будівельних конструкцій за температурним режимом вуглеводневої пожежі;
2. Виконати теплофізичний розрахунок залізобетонних конструкцій за температурним режимом вуглеводневої пожежі;
3. Виконати статичний розрахунок залізобетонних конструкцій за температурним режимом вуглеводневої пожежі.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Аналіз методів розрахунку і перевірки вогнестійкості залізобетонних конструкцій,

що наведені в ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2 [16], було проведено на предмет можливості їх застосування для температурного режиму вуглеводневої пожежі (див. Табл. 1).

Табл. 1. Зведена таблиця щодо методів перевірки та розрахунку вогнестійкості

Table 1. Summary table showing alternative methods of verification and design methods for fire resistance

Методи перевірки	Розрахункові методи		
	Табличні дані	Спрощені методи розрахунку	Уточнені моделі розрахунку
Аналіз окремої конструкції	ТАК - тільки для стандартного температурного режиму - дані можуть бути перероблені для інших температурних режимів пожежі	ТАК - стандартний та параметричний температурні режими; - температурні криві наведено тільки для стандартного температурного режиму; - моделі, що враховують зміну властивостей матеріалів, застосовують тільки для температурних режимів, аналогічних стандартному	ТАК Тільки основні положення
Аналіз частини конструктивної системи	НІ	ТАК - стандартний та параметричний температурні режими; - температурні криві наведено тільки для стандартного температурного режиму; - моделі, що враховують зміну властивостей матеріалів, застосовуються тільки для температурних режимів аналогічних стандартному	ТАК Тільки основні положення
Загальний аналіз конструктивної системи	НІ	НІ	ТАК Тільки основні положення

Згідно з ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2 [16] розрахунок на вогнестійкість за температурним режимом вуглеводневої пожежі можливо виконувати тільки за допомогою уточнених методів. Табличні дані і спрощені методи можна застосувати тільки для стандартного температурного режиму. Однак передбачено можливість модернізації цих методів для температурних режимів, відмінних від стандартного.

Щодо спрощених розрахункових методів – методу ізотерми 500°C і зонального методу, слід зауважити, що метод ізотерми 500°C може застосовуватися у тому числі і для температурного режиму вуглеводневої пожежі, тоді як зональний метод – лише для стандартного режиму пожежі. Таким чином,

метод ізотерми 500°C може бути використано для визначення залишкового приведенного перерізу залізобетонної конструкції, що зазнає вогневого впливу за температурним режимом вуглеводневої пожежі.

Результати аналізу щодо можливості застосування методів перевірки і методів розрахунку для стандартного і вуглеводневого режимів пожежі представлено у таблиці 2.

В цілому для оцінки вогнестійкості залізобетонних конструкцій за температурним режимом вуглеводневої пожежі було застосовано метод скінчених елементів, як один з уточнених методів, що дає змогу проаналізувати як температурний розподіл, так і напружено-деформований стан конструкції.

Табл. 2. Застосування методів перевірки і розрахунку для різних температурних режимів пожежі
Table 2. Usage of methods of verification and design methods for different fire curves

Температурний режим пожежі	Методи перевірки	Методи розрахунку на вогнестійкість				
		Табличні дані	Спрощені		Уточнені	
			Ізотерми 500°C	Зональний	Теплофізичний	Статичний
1	2	3	4	5	6	7
Стандартний	Аналіз окремої конструкції	+	+	+	+	+
	Аналіз частини конструктивної системи	-	+	+	+	+
	Загальний аналіз конструктивної системи	-	-	+	+	+
Вуглеводневий	Аналіз окремої конструкції	-	+	-	+	+
	Аналіз частини конструктивної системи	-	+	-	+	+
	Загальний аналіз конструктивної системи	-	-	-	+	+

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

У цій статті було виконано розрахунок монолітних залізобетонних стін, колон і плит на вогнестійкість за температурним режимом вуглеводневої пожежі. Конструкції для розрахунку на вогнестійкість були

прийняті як такі, що є характерними для захисних споруд навколо об'єктів критичної енергетичної інфраструктури. Розміри перерізу, умови обігріву і нормовані класи вогнестійкості залізобетонних конструкцій наведені в таблиці 3.

Табл. 3. Характеристики конструкцій для розрахунку на вогнестійкість
Table 3. Characteristics of the structural members for fire resistance analysis

Ч.ч.	Найменування конструкції	Розміри перерізу, мм	Висота, мм.	Умови обігріву сторін	Нормований клас вогнестійкості
1	2	3	4	5	6
1	Стіна монолітна залізобетонна	400	-	1	REI120
2	Плита монолітна залізобетонна	300	3600	1	REI45
3	Колона монолітна залізобетонна	800x800	3600	4	R120

Розрахунок залізобетонних конструкцій на вогнестійкість за температурним режимом вуглеводневої пожежі було виконано із застосуванням програмного комплексу ЛІРА-САПР 2024 R2.2. Вплив таких факторів, як вологість, вид заповнювача бетону і вибухоподібне крихке руйнування бетону на вогнестійкість в розрахунку не враховували.

Теплофізичний розрахунок

Теплофізичний розрахунок конструкцій

було виконано за умов, що моделюють вогневий вплив пожежі, яка розвивається за температурним режимом вуглеводневої пожежі: на стіни і плити – з однієї сторони, на колони – з чотирьох сторін. Тривалість вогневого впливу пожежі була прийнята відповідно до нормованого класу вогнестійкості конструкцій (таблиця 3). Для визначення розподілу температури в елементах поперечного перерізу конструкцій було вирішено нестационарну задачу теплопровідності [19].

Розрахункові моделі поперечних перерізів конструкцій складалася із чотирикутних (тип 1509) та стрижневих (типи 1505 і 1555) скінченних елементів теплопровідності, які моделювали матеріал і обігрівані грані конструкцій.

Характеристики жорсткості скінченних

елементів конструкцій були задані як залежність теплофізичних характеристик бетону і арматури від температури. Залежність теплофізичних характеристик бетону і сталі від температури була прийнята згідно з ДСТУ-Н EN 1992-1-2 [16]. Розрахункові значення теплофізичних характеристик матеріалів наведені в таблиці 4.

Табл. 4. Розрахункові теплофізичні характеристики матеріалів
Table 4. Design values of thermal material properties

Матеріал	Значення теплофізичної характеристики			Коефіцієнт конвекційного теплообміну, α_c , Вт/м ² К		Ступінь чорноти поверхні конструкції, ϵ_m
	Теплопровідність, Дж/(м·с·°С)	Теплоємність, Дж/(кг·°С)	Густина, кг/м ³	Вуглеводневий	Стандартний	
1	2	3	4	5	6	7
Бетон	1,003	1050	2300	50	25	0,7
Сталь	44	565	7850	-	-	0,7

Результати теплофізичного розрахунку залізобетонної стіни, плити і колони за температурним режимом вуглеводневої пожежі було представлено у вигляді ізополів

та значень температури в бетоні та арматурі конструкцій у момент часу, що відповідає нормованій межі вогнестійкості конструкцій (рис. 2-4).

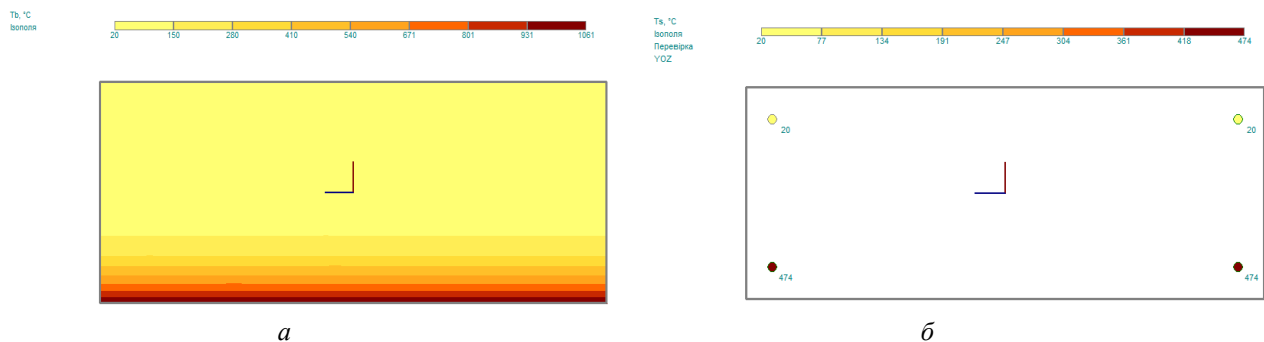


Рис.2. Розподіл температури в перерізі стіни після 120 хв вогневого впливу: *a* бетон; *б* арматура
Fig.2. Temperature profiles (°C) for a wall after 120 min of fire exposure: *a* – concrete; *b* – reinforcing steel

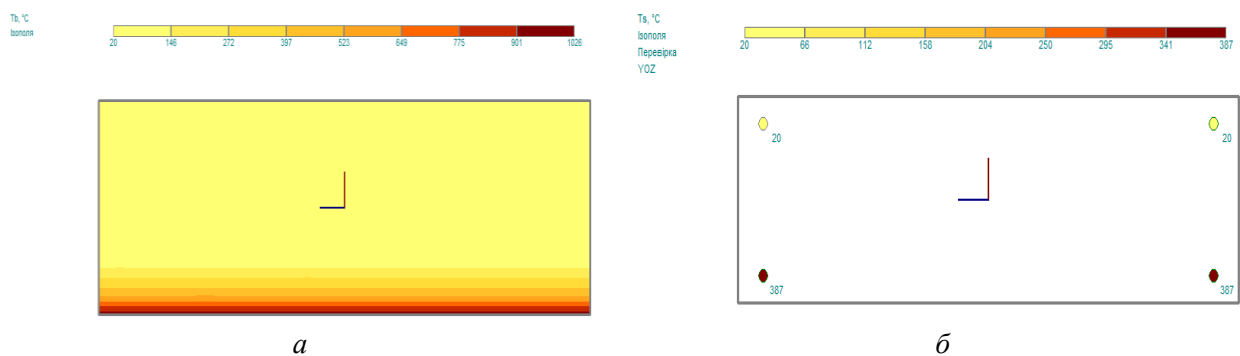


Рис.3. Розподіл температури в перерізі плити після 45 хв вогневого впливу: *a*) бетон; *б*) арматура
Fig.3. Temperature profiles (°C) for a slab after 45 min of fire exposure: *a* – concrete; *b* – reinforcing steel

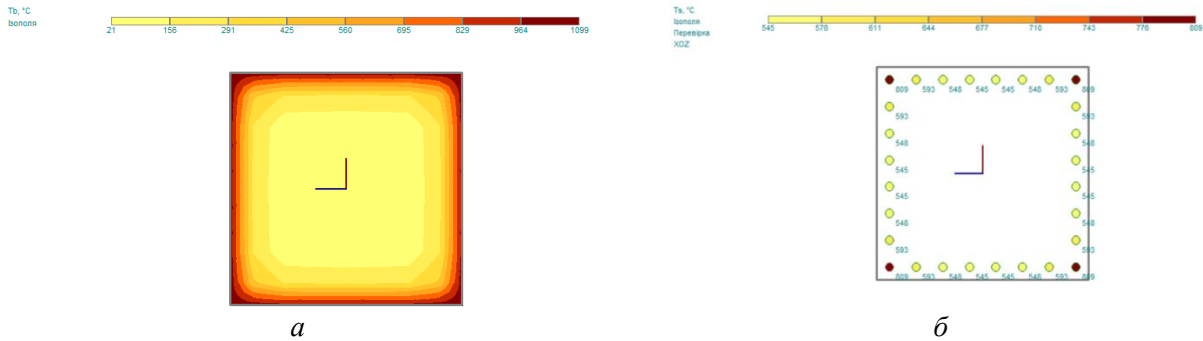


Рис.4. Розподіл температури в перерізі колони після 120 хв вогневого впливу: *a*-бетон; *б*- арматура
Fig.4. Temperature profiles (°C) for a column after 120 min of fire exposure: *a* – concrete; *b* – steel

За результатами теплофізичного розрахунку стін і плит було встановлено, що перевищення середньої температури необігріваної поверхні над початковою є меншим за граничне значення 140 °C, що відповідає ДСТУ Б В.1.1-4 [12].

На підставі аналізу результатів теплофізичного розрахунку було встановлено, що товщина стін і плит, які зазнають вогневого впливу за температурним режимом вуглеводневої пожежі, є достатньою для забезпечення межі їх вогнестійкості за ознакою втрати теплоізолювальної здатності. Для

запобігання крихкого руйнування бетону стін і колон захисний шар необхідно армувати протискольною сіткою..

Статичний розрахунок

Залишкову несучу здатність залізо-бетонних конструкцій після вогневого впливу за температурним режимом вуглеводневої пожежі було обчислено для їх приведеного перерізу. Конструктивні рішення залізобетонних стін, плит і колон зведені до таблиці 5.

Табл. 5. Конструктивні характеристики залізобетонних стін, плит і колон
Table 5. Structural characteristics of the reinforced concrete walls, slabs, and columns

Ч.ч.	Найменування конструкції	Клас бетону	Армування конструкцій, поздовжнє робоче	Відстань до осі робочої арматури з обігріваної сторони, мм
1	2	3	4	5
1	Стіна монолітна залізобетонна	C32/40	Ø20A500C, к.100 мм	60
2	Плита монолітна залізобетонна		Ø16A500C, к.200 мм	40
3	Колона монолітна залізобетонна		28Ø32A500C	50

Розміри приведенного перерізу залізо-бетонних конструкцій було визначено шляхом відкидання частини пошкодженого бетону, a_{500} , що відповідає середній глибині розташування ізотерми 500°C внаслідок вогневого впливу за температурним режимом вуглеводневої пожежі, див. метод ізотерми 500°C [16]. Розташування ізотерми 500°C в перерізі стін, плит і колон наведено на рис. 5, 6. Розрахункові значення розмірів приведенного перерізу конструкцій наведені в таблиці 6.

Табл. 6. Розміри приведенного перерізу
Table 6. Dimensions of the residual cross-section

Ч.ч.	Найменування конструкції	Розмір, h_{fi} (b_{fi}), мм
1	2	3
1	Стіна монолітна залізобетонна	344
2	Плита монолітна залізобетонна	270
3	Колона монолітна залізобетонна	690

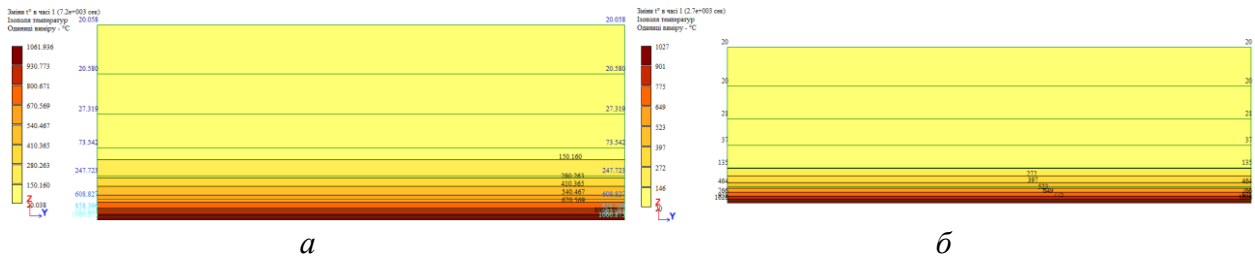


Рис.5. Ізотерми 500°C в перерізі конструкцій після вогневого впливу: а) стін – 120 хв; б) плит – 45 хв

Fig.5. 500°C isotherm in the cross section after fire exposure: a – walls after 120 min; b – slabs after 45 min

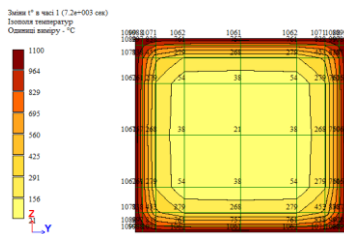


Рис.6. Ізотерма 500°C в перерізі колон після вогневого впливу 120 хв

Fig.6. 500°C isotherm in the cross section of column after 120 min of fire exposure

Міцність бетону та арматури конструкцій було прийнято з урахуванням їх зниження внаслідок вогневого впливу за температурним режимом вуглеводневої пожежі (рис. 7-9).

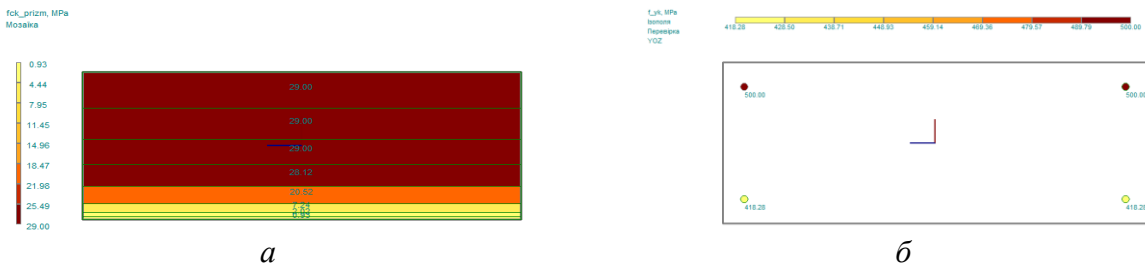


Рис.7. Зниження міцності матеріалів стін після 120 хв вогневого впливу: а) бетон; б) арматура

Fig.7. Residual strength of materials for walls after 120 min of fire exposure: a – concrete; b – steel

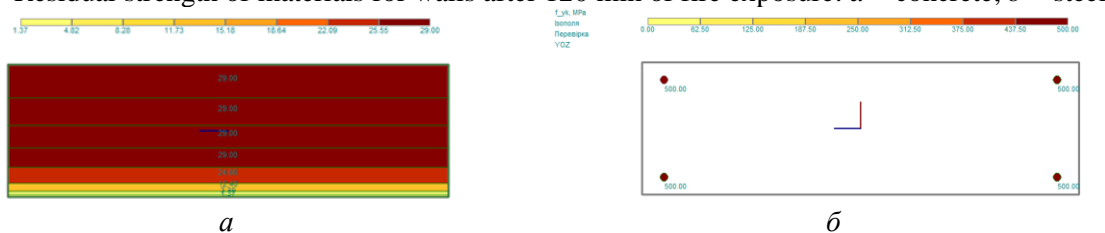


Рис.8. Зниження міцності матеріалів плит після 45 хв вогневого впливу: а) бетон; б) арматура

Fig.8. Residual strength of materials for slabs after 45 min of fire exposure: a – concrete; b – steel

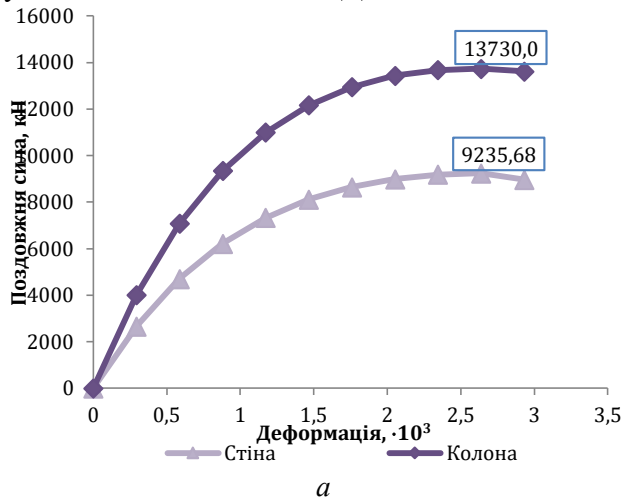


Рис.9. Зниження міцності матеріалів колон після 120 хв вогневого впливу: а) бетон; б) арматура

Fig.9. Residual strength of materials for columns after 120 min of fire exposure: a – concrete; b – steel

Розрахунок несучої здатності залізобетонних конструкцій було виконано за деформаційним методом для нормальних температур за ДБН В.2.6-98 [20], із характеристичними значеннями міцності бетону і арматури.

Несучу здатність перерізу конструкцій було обчислено згідно з ДСТУ Б В.2.6-156



[21]: стін і колон – для 1-ї форми рівноваги, плит – для 2-ї форми рівноваги.

За результатами розв'язання системи рівнянь рівноваги перерізу було побудовано графіки: для стін і колон – «поздовжня сила-деформація стиснутої грані», для плит – «згинальний момент-кривизна» (рис. 10)

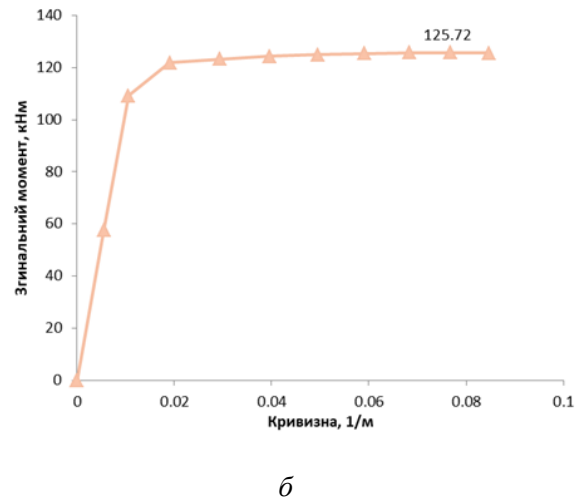


Рис.10. Діаграми несучої здатності розглянутих конструкцій за нормальних температур: *a* - стін і колон; *б* - плит

Fig.10. Diagrams of load bearing capacity of considered structural members at normal temperature: *a* - walls and columns; *b* – slabs

Найбільше значення зусилля на цих графіках відповідає несучій здатності конструкції, $N_{u,fi}$.

Для оцінки вогнестійкості за ознакою втрати несучої здатності залізобетонних конструкцій, які зазнають вогневого впливу за температурним режимом вуглеводневої пожежі, слід порівняти їх залишкову несучу здатність (рис. 10) із зусиллями, що виникають у цих конструкціях від аварійного сполучення навантажень у разі пожежі.

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Комплексний підхід до гарантування безпеки об'єктів критичної енергетичної інфраструктури в умовах воєнного стану має передбачати захист як від засобів ураження, так і від пожеж високої інтенсивності, спричинених цими ураженнями.

На підставі аналізу результатів теплофізичного розрахунку було встановлено, що товщина стін і плит, які зазнають вогневого

впливу за температурним режимом вуглеводневої пожежі, є достатньою для забезпечення межі їх вогнестійкості за ознакою втрати теплоізолювальної здатності. Крихкому руйнуванню бетону стін і колон слід запобігати за допомогою армування захисного шару протискольною сіткою.

Для оцінки вогнестійкості за ознакою втрати несучої здатності залізобетонних конструкцій, які зазнають вогневого впливу відповідної тривалості за температурним режимом вуглеводневої пожежі, слід порівняти їх несучу здатність із зусиллями, що виникають у цих конструкціях від аварійного сполучення навантажень у разі пожежі. Результатами статичного розрахунку є несуча здатність розглянутих конструкцій стін, плит і колон після вогневого впливу пожежі.

Подальші дослідження цієї проблеми можуть стосуватися вивчення теплофізичних, міцнісних і деформаційних властивостей бетону та арматури за підвищених температур,

що відповідають інтенсивності температурного режиму вуглеводневої пожежі.

ЛІТЕРАТУРА

- Атаки на енергетичну інфраструктуру України: Шкода цивільному населенню. Моніторингова місія ООН з прав людини в Україні, Бюлетень 2024. 17 с. URL: <https://ukraine.ohchr.org/sites/default/files/2024-09/UKR%20Attacks%20on%20Ukraine's%20Energy%20Infrastructure-%20%20Harm%20to%20the%20Civilian%20Population.pdf>
- Київська школа економіки (2024) Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії росії проти України станом на 1 вересня 2024 р.
- Civilian Harm in Ukraine Homepage, <https://ukraine.bellingcat.com>, last accessed 2024/12/05. <https://ukraine.bellingcat.com/?color=asc9&filter=asc9&range=2022-11-22&range=2024-12-05>
- Азаренко, О., & Гончаренко, Ю., & Дівізніук, М., & Мірненко, В., & Стрілець, В. (2021) Шляхи підвищення ефективності систем фізичного захисту об'єктів критичної інфраструктури держави, що охороняються. *Journal of Scientific Papers "Social Development and Security"*. 11 (4), 200-213. DOI: 10.33445/sds.2021.11.4.18
- Методичні рекомендації з інженерного захисту будівель, споруд та дахів об'єктів критичної інфраструктури України (2022) <https://vasylivskagr.gov.ua/news/1671612745/>
- Рішення Ради національної безпеки і оборони України від 17 жовтня 2023 року «Про організацію захисту та забезпечення безпеки функціонування об'єктів критичної інфраструктури та енергетики України в умовах ведення військових дій» <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0040525-23#Text>
- Коцюрuba, В., & Білик, А., & Веретнов, А., Гайдарли Г., & Борта Р., & Тертишний Б. (2022) Методика розрахунків та обґрунтування вимог до інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури від БпЛА типу баражуючий боеприпас *Onip materialiv i teoriya sporud / Strength of Materials and Theory of Structures*. 2022. № 109, 164-183 DOI:10.32347/2410-2547.2022.109.164-183
- Коваль, М., & Коваль, В., & Коцюрuba, В., Білик А. (2022). Організаційно-технічні засади побудови системи інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури енергетичної галузі України. *Наука і оборона*, № 3-4 (2022), 11–16. <https://doi.org/10.33099/2618-1614-2022-20-3-4-11-16>
- Сахаров, В., & Литвин, О. (2023). Вплив вибухової ударної хвилі на покриття захисної споруди критичної інфраструктури. *Основи та Фундаменти / Bases and Foundations*, (47), 107–114. <https://doi.org/10.32347/0475-1132.47.2023.107-114>
- Вахітова Л., & Таран Н., Бессарабов В., Дріжд В., Придятько С., Прудченко А. (2018) Розроблення вогнезахисного покриття для умов вуглеводневої пожежі з покращеними реологічними характеристиками. *ВІСТІ Донецького гірничого інституту* №1(42), 103-115 [doi:10.31474/1999-981X-2018-1-103-115](https://doi.org/10.31474/1999-981X-2018-1-103-115)
- ДБН В.1.2-7:2021. Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека : – [Чинні від 2022-09-01]. – К. : Мінрегіон України, Державне підприємство «Украрх-будінформ», 2022. –17 с. – (Державні будівельні норми)
- ДСТУ Б В.1.1-4-98* Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги : – [Чинний з 1999-03-01]. – К. : Держбуд України, 2005. – 43 с. – (Національний стандарт України)
- ДСТУ EN 1991-1-2:2010 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (EN 1991-1-2:2002, IDT) : – [Чинний з 2013-07-01]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 81 с. – (Національний стандарт України)
- Куліш, Я., & Скорук, Л. (2023) Дослідження впливу типу пожежі і сторони дії полум'я на залізобетонну колону. *ВМС-2023 – International Scientific-Practical Conference of young scientists "Build-Master-Class-2023"* December 2023,
- Hawileh R.A., & Kodur V.K.R. (2018) Performance of reinforced concrete slabs under hydrocarbon fire exposure. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 77 (2018), 177–187. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.03.024>
- ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1992-1-2:2004, IDT) : – [Чинний з 2013-07-01]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 135 с. – (Національний стандарт України)

17. **Zhang et al.** (2024) Fire behavior of composite steel truss bridge girders: numerical investigation and design strategies *Advances in Bridge Engineering* 5:36
<https://doi.org/10.1186/s43251-024-00150-4>
18. **Al-Kaseasbeh Q.** (2023) Analysis of hydro-carbon fire-exposed cold-formed steel columns. *Results in Engineering*, 20 (2023), 1-11
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101400>
19. **Колякова, В., & Божинський, М., & Фесенко О.** (2016) Розподіл температури в перерізі залізобетонної плити // *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. – Вип. 5. – С. 232-239
20. **ДБН В.2.6-98:2009.** Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення : – [Чинні від 2011-06-01]. – К. : *Мінрегіонбуд України, Державне підприємство «Укрархбудінформ»*, 2011. – 71 с. – (Державні будівельні норми)
21. **ДСТУ Б.В.2.6-156:2010** Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування :. – [Чинний з 2011-06-01]. – К. : *Мінрегіонбуд України*, 2011. – 118 с. – (Національний стандарт України)
5. **Metodychni rekomendatsii** z inzhenerneho zakhystu budivel, sporud ta dakhiv ob'ektiv krytychnoi infrastruktury Ukrainy (2022) <https://vasylivskagr.gov.ua/news/1671612745/20>
6. **Rishennia Rady natsionalnoi bezpeky i oborony Ukrainy** vid 17 zhovtnia 2023 roku «Pro orhanizatsiiu zakhystu ta zabezpechennia bezpeky funktsionuvannia ob'ektiv krytychnoi infrastruktury ta enerhetyky Ukrainy v umovakh vedennia voiennykh dii» <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0040525-23>
7. **Kotsiuruba, V., & Bilyk, A., & Veretnov, A., Haidarly H., & Borta R., & Tertyshnyi B.** (2022) *Metodyka rozrakhunkiv ta obruntuvannia vymoh do inzhenerneho zakhystu ob'ektiv krytychnoi infrastruktury vid BpLA typu barazhuyuchy boieprypas Opir materialiv i teoriiia sporud / Strength of Materials and Theory of Structures*. 2022. № 109, p.164-183
[DOI:10.32347/2410-2547.2022.109.164-183](https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.164-183)
8. **Koval, M., & Koval, V., & Kotsiuruba, V., Bilyk A.** (2022). Orhanizatsiino-tekhnichni zasady pobudovy systemy inzhenerneho zakhystu ob'ektiv krytychnoi infrastruktury enerhetychnoi haluzi Ukrainy. *Nauka i oborona*, № 3-4 (2022), 11–16.
<https://doi.org/10.33099/2618-1614-2022-20-3-4-11-16>

REFERENCES

1. Ataky na enerhetychnu infrastrukturu Ukrainy: Shkoda tsyvilnomu naselenniu. Monitorynhova misiia OON z prav liudyny v Ukraini, Biuletyn 2024. 17 s. URL: <https://ukraine.ohchr.org/sites/default/files/2024-09/UKR%20Attacks%20on%20Ukraines%20Energy%20Infrastructure-%20Harm%20to%20the%20Civilian%20Population.pdf>
2. Kyivska shkola ekonomiky (2024) Zvit pro priami zbytky infrastruktury vid ruiny vnaslidok viiskovoi ahresii rosiy proty Ukrainy stanom na 1 veresnia 2024 r.
3. **Civilian Harm** in Ukraine Homepage, <https://ukraine.bellingcat.com>, last accessed 2024/12/05.
<https://ukraine.bellingcat.com/?color=asc9&filter=asc9&range=2022-11-22&range=2024-12-05>
4. **Azarenko, O., & Honcharenko, Yu., & Diviziniuk, M., & Mirnenko, V., & Strilets, V.** (2021) Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti system fizychnoho zakhystu ob'ektiv krytychnoi infrastruktury derzhavy, shcho okhoroniaiutsia. *Journal of Scientific Papers “Social Development and Security”*. 11 (4), 200-213.
[DOI: 10.33445/sds.2021.11.4.18](https://doi.org/10.33445/sds.2021.11.4.18)
11. **DBN V.1.2-7:2021.** Osnovni vymohy do budivel i sporud. Pozhezhna bezpeka : – [Chynni vid 2022-09-01]. – К. : *Minrehion Ukrainy, Derzhavne pidpriemstvo «Ukrarkhbudinform»*, 2022. –17 s. – (Derzhavni budivelni normy)
12. **DSTU B V.1.1-4-98*** Zakhyst vid pozhezhi. Budivelni konstruktzii. Metody vyprobuvan na vohnestiikist. Zahalni vymohy : – [Chynnyi z

- 1999-03-01]. – К. : Derzhbud Ukrainy, 2005. – 43 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy)
13. **DSTU EN 1991-1-2:2010** Ievrokod 1. Dii na konstruksii. Chastyna 1-2. Zahalni dii. Dii na konstruksii pid chas pozhezhi (EN 1991-1-2:2002, IDT) : – [Chynnyi z 2013-07-01]. – К. : Minrehionbud Ukrainy, 2011. – 81 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy)
14. **Kulish, Ya., & Skoruk, L.** (2023) Doslidzhennia vplyvu typu pozhezhi i storony dii polumia na zalizobetonnu kolonu. BMC-2023 – *International Scientific-Practical Conference of young scientists "Build-Master-Class-2023" December 2023*
15. **Hawileh R.A., & Kodur V.K.R.** (2018) Performance of reinforced concrete slabs under hydrocarbon fire exposure. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 77 (2018), 177–187.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.03.024>
16. **DSTU-N B EN 1992-1-2:2012** Ievrokod 2. Proektuvannia zalizobetonnykh konstruksii. Chastyna 1-2. Zahalni polozhennia. Rozrakhunok konstruksii na vohnestiikist (EN 1992-1-2:2004, IDT) : – [Chynnyi z 2013-07-01]. – К. : Minrehionbud Ukrainy, 2011. – 135 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy)
17. **Zhang et al.** (2024) Fire behavior of composite steel truss bridge girders: numerical investigation and design strategies *Advances in Bridge Engineering* 5:36
<https://doi.org/10.1186/s43251-024-00150-4>
18. **Al-Kaseasbeh Q.** (2023) Analysis of hydrocarbon fire-exposed cold-formed steel columns. *Results in Engineering*, 20 (2023).1-11
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101400>
19. **Koliakova, V., & Bozhynskyi, M., & Fesenko O.** (2016) Rozpodil temperatury v pererizi zalizobetonnoi plyty // *Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*. – Vyp. 5. – S. 232-239
20. **DBN V.2.6-98:2009**. Betonni ta zalizobetonni konstruksii. Osnovni polozhennia : – [Chynni vid 2011-06-01]. – К. : Minrehionbud Ukrainy, Derzhavne pidpriemstvo «Ukrarkhbudinform», 2011. – 71 s. – (Derzhavni budivelni normy)
21. **DSTU B.V.2.6–156:2010**. Betonni ta zalizobetonni konstruksii z vazhkoho betonu. Pravyla proektuvannia : – [Chynnyi z 2011-06-

01]. – К. : Minrehionbud Ukrainy, 2011. – 118 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy)

FIRE RESISTANCE ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES SUBJECTED TO HYDROCARBON FIRE EXPOSURE

*Oleg FESENKO,
Vira KOLIAKOVA,
Leonid SKORUK,
Lyubov ANDRIICHENKO*

Summary. Critical infrastructure facilities of Ukraine, in particular energy generating, are often the target of terrorist attacks by the Russian Federation army. Such facilities require engineering protection of buildings, structures, and roofs. The occurrence of fire may accompany destruction and damage to building structures due to explosive effects.

Fires at critical infrastructure facilities are characterized by high intensity. The hydrocarbon fire curve is characterized by a rapid increase in temperature to 1100°C in the first 5 minutes after ignition.

Fire resistance analysis according to a hydrocarbon fire curve can only be performed using advanced methods. Tabulated data and simplified methods are given for standard fire only.

This article presents the results of the fire resistance analysis of cast-in-place reinforced concrete walls, columns, and slabs for the hydrocarbon fire curve. The structures for the fire resistance analysis were taken as typical for protective structures around critical energy infrastructure facilities.

Thermal analysis of structures subjected to fire that develops under the hydrocarbon fire curve: walls and slabs exposed to fire at one side and columns exposed to fire at four sides.

The residual load-bearing capacity of reinforced concrete structures after fire exposure according to the hydrocarbon fire curve was calculated for their reduced cross-section.

Keywords: fire resistance; energy generating critical infrastructure facilities; hydrocarbon fire curve; reinforced concrete structures; terrorist attacks by the RF army against Ukraine.

Стаття надійшла до редакції 11.10.2024