

УДК 69.059.22:699.8

*к.т.н. Маладика І. Г.,  
ад'юнкт Шкарабура І. М.  
(ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ, м. Черкаси, Україна)*

## ПРАКТИЧНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

*У статті викладено методичні підходи щодо розрахунку сталевих конструкцій на вогнестійкість, наведено практичні методи визначення вогнестійкості сталевих конструкцій будівель та споруд. Науковою новизною можна вважати пропозиції щодо практичного використання методів визначення вогнестійкості сталевих конструкцій, у тому числі і для оцінки їхнього технічного стану після пожежі.*

**Ключові слова:** сталеві конструкції, температурні впливи, вогнестійкість, технічний стан.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями.**

В сучасній практиці будівництва сталеві конструкції мають широке використання. Це пояснюється тією обставиною, що сталь має високу міцність, надійно працює при різних видах навантаження, відповідає вимогам довговічності (за умов використання надійних засобів захисту). Сталеві конструкції індустріальні, тобто виготовляються на спеціалізованих заводах. Окремі елементи, конструкції (відправні марки) транспортуються до місця будівництва, монтуються та встановлюються у проектне положення з використанням підйомно-транспортних засобів.

Непроникливість для рідин і газів матеріалі конструкцій та вузлів дозволяє виконувати водонепроникні та газонепроникні конструкції.

Висока міцність, надійність, індустріальність виготовлення з урахуванням принципів уніфікації, стандартизації їхніх елементів, можливість транспортування на великі відстані, малі строки монтажу, відносна легкість, у порівнянні із залізобетонними конструкціями, складають економічність використання сталевих конструкцій у будівництві.

Крім того, сталеві конструкції зручні в експлуатації, оскільки легко ремонтуються та можуть бути легко підсилені під час

проведення робіт з реконструкції при збільшенні навантажень. Але сталеві конструкції мають і недоліки: схильність до корозії, що потребує спеціальних заходів щодо захисту; мала вогнестійкість при температурах, які перевищують 400 °С, що також потребує проведення відповідних заходів щодо захисту конструкцій від впливу високих температур.

Фактична межа вогнестійкості сталевих конструкцій при «стандартному» режимі пожежі, залежно від товщини елементів перерізу та величини діючого напруження складає від 6 до 24 хв.

При проектуванні будівель та споруд межу вогнестійкості незахищених сталевих конструкцій з приведеною товщиною металу в 10 мм допускається приймати такою, що дорівнює 15 хв. Значення ж необхідних меж вогнестійкості основних будівельних конструкцій, у тому числі металевих, складають від 15 до 150 хв. в залежності від ступеню вогнестійкості будівлі та типу конструкцій. Таким чином, більшість незахищених сталевих конструкцій задовольняють лише вимогам по межі вогнестійкості 15 хв. Це дозволяє зробити висновок про те, що сфера застосування металевих конструкцій обмежена по вогнестійкості, оскільки не виконується умова

© Маладика І. Г., 2018

© Шкарабура І. М., 2018

безпеки –  $R_f \geq R_u$  [1, 2], де  $R_f, R_u$  – відповідно фактичний і нормований для відповідної конструкції клас вогнестійкості за ознакою втрати несучої здатності.

Ця умова безпеки є основним критерієм обґрунтування необхідності вогнезахисту металевих конструкцій, тобто якщо  $R_f \geq R_u$  – то вогнезахист не потрібний, а при  $R_f < R_u$  – вогнезахист потрібний.

Найбільш надійними способами вогнезахисту нині вважаються [1, 3]: облицювання з негорючих матеріалів; вогнезахисні покриття; підвісні стелі.

В якості облицювальних матеріалів для вогнезахисту металоконструкцій використовуються бетон, цеглина, гіпсокартонні листи й інші плиткові і листові вироби, а також різні типи штукатурки.

Згідно ДСТУ Б В.1.1–4–98\* [2], фактичні межі вогнестійкості будівельних конструкцій визначаються при дії нормативних навантажень (приймаються характеристичні значення величин навантажень згідно ДБН В.1.2-2:2006 [5]). Величини нормативних навантажень встановлюються залежно від призначення конструкцій і умов їх експлуатації.

Класифікація навантажень, що використовується в ДБН В.1.2-2:2006 [5], дозволяє віднести випадок пожежі до особливих впливів. У відповідності з цим, для оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій використовуються постійні та тривалі навантаження.

Межею вогнестійкості будівельних конструкцій називають показник вогнестійкості конструкцій, який визначається часом від початку вогневого випробування за стандартним температурним режимом до настання одного з нормованих для даної конструкції граничних станів з вогнестійкості [2]. Межа вогнестійкості знижується зі збільшенням навантажень, що діють на конструкції.

На несучу здатність і деформативність будівельних конструкцій, що знаходяться в умовах пожежі, впливають фізико-

механічні властивості матеріалу конструкції, які змінюються залежно від температури нагріву. Зокрема, такі властивості визначаються межею міцності (R) і модулем пружності (E) матеріалу, з якого виконані конструкції.

При зміні температури від 20 °С до 200...300 °С межа міцності деяких марок сталей і бетону збільшується: в першому випадку за рахунок зниження технологічних напружень, а в другому – за рахунок зменшення вільної вологи в порах бетону.

Збільшення температури матеріалу сприяє зниженню його модуля пружності, тобто деформативність конструкції при цьому збільшується. Модуль пружності конструкційних матеріалів при збільшенні температури знижується. Деформації температурного розширення арматурних сталей зростають із зростанням температури до 700 °С.

#### **Аналіз останніх досягнень і публікацій.**

До чинників, що визначають поведінку будівельних конструкцій в умовах пожежі, відносять [1, 2, 3, 4 та ін.]:

- ступінь навантаження конструкцій та окремих елементів;
- вигляд і кількість пожежного навантаження, що визначає температурний режим, а також теплоту пожежі;
- теплове навантаження на конструкцію;
- теплофізичні та фізико-механічні характеристики матеріалів, з яких виконано будівельні конструкції;
- умови нагріву та способи з'єднання конструкцій.

Досвід експлуатації сталевих конструкцій свідчить про їхній достатній запас несучої здатності за умов відсутності непередбачуваних силових і високотемпературних впливів. Суттєвими причинами підвищеної небезпеки для конструкцій, що експлуатуються, за таких умов, розглядаються перерозподіл внутрішніх зусиль в елементах, нерівномірний нагрів і зміна характери-

стик міцності та деформативності матеріалу конструкцій (сталі) під час і після пожежі за умови руйнування вогнезахисних покриттів. У зв'язку з цим виникає необхідність в проведенні робіт із обстеження, визначення та регулювання технічного стану для відновлення експлуатаційної придатності конструкцій з урахуванням прогнозу можливої зміни визначальних параметрів технічного стану і можливого руйнування конструкцій після високотемпературних впливів. При цьому необхідно вирішувати питання, які пов'язані із забезпеченням тривалої та надійної експлуатації конструкцій за рахунок прийняття відповідних матеріалів або захисних заходів, а також визначення напружено-деформованого стану конструкцій при різних впливах і виконанням робіт із продовження терміну експлуатації як окремих конструкцій, так і будівель в цілому [4, 6, 7 та ін.].

**Постановка завдань. Метою** цієї роботи є розробка методичних підходів щодо розрахунку сталевих конструкцій на вогнестійкість, а також практичних методів визначення вогнестійкості сталевих конструкцій будівель та споруд.

**Представлення основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів.**

Згідно ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 [4], розрахунок будівельних конструкцій на вогнестійкість (окремої конструкції, частини конструктивної системи або конструктивної системи в цілому) враховує такі етапи:

- 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 впливів для теплового аналізу та впливів для механічного аналізу.

Навантаження і впливи на будівлі та споруди внаслідок пожежі класифікують як випадкові (аварійні).

Для визначення аварійної проектної ситуації на основі оцінки пожежного ризику визначені відповідні проектні сценарії пожежі та температурні режими, що пов'язані з ними.

Для конструкцій з особливим ризиком виникнення пожежі внаслідок інших аварійних впливів, цей ризик розглядають при визначенні загальної концепції безпеки.

Перевірку вогнестійкості виконують в інтервалі часу згідно вимог п. 5.5.2 ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 [4]:

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ}, \quad (1)$$

або в інтервалі міцності:

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}, \quad (2)$$

або в інтервалі температури:

$$\Theta_d \geq \Theta_{cr,d}, \quad (3)$$

де  $t_{fi,d}$  – розрахункове значення межі вогнестійкості, хв.;  $t_{fi,requ}$  – нормована межа вогнестійкості, хв.;  $R_{fi,d,t}$  – розрахункове значення несучої здатності окремої конструкції під час пожежі в момент часу  $t$ , кН;  $E_{fi,d,t}$  – розрахункове значення навантажувального ефекту під час пожежі в момент часу  $t$ , кН;  $\Theta_d$  – розрахункове значення температури матеріалу, °С;  $\Theta_{cr,d}$  – розрахункове значення критичної температури матеріалу, °С.

Теплові впливи для теплотехнічного розрахунку визначаються у відповідності з вимогами підрозділу 5.6 ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 [4].

Для кожного проектного сценарію пожежі температурний режим пожежі у протипожежному відсіку оцінюють наступним чином. На обігрівних поверхнях цей тепловий потік  $\dot{h}_{net}$  визначений, враховуючи конвективну  $\dot{h}_{net,c}$  (Вт/м<sup>2</sup>) та радіаційну  $\dot{h}_{net,r}$  (Вт/м<sup>2</sup>) його складові

згідно п. 5.6.1.2 ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 [4]:

$$\dot{h}_{\text{net}} = \dot{h}_{\text{net,c}} + h_{\text{net,r}} \quad (4)$$

Конвективну складову теплового потоку визначають за формулою:

$$\dot{h}_{\text{net,c}} = \alpha_c \cdot (\Theta_g - \Theta_m), \quad (5)$$

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

Коефіцієнти, які входять до формул (1), (2), (3), (4), (5) визначаються за методикою і формулами, які наведено в підрозділі 5.6 ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 [4].

Розрахункові методи визначення вогнестійкості мають бути підтверджені відповідними випробуваннями конструкцій. Випробування виконуються у послідовності, яку регламентовано вимогами відповідних нормативних документів [8, 9, 10 та ін.]. Граничним станом з вогнестійкості сталевих конструкцій за ознакою втрати несучої здатності (ознака R) є перевищення середньої температури сталевих колон значення її початкової температури на 480°С (для сталевих конструкцій).

Для визначення вогнестійкості сталевих колон випробуванням піддаються зразки сталевих колон висотою не менше 2 (двох) метрів за ДСТУ Б В.1.1-14:2007 [9] з різними рівномірно розподіленими товщиною облицювання, що знаходяться в межах діапазону, які рекомендовано виробником (замовником). Мінімальна кількість колон, що випробовуються, повинна бути:

- 4 (чотири), коли відношення максимального значення товщини облицювання до мінімального значення менше 1,5, а саме 2 пари по два однакових зразка колон з однаковою товщиною облицювання;

- 6 (шість), коли таке відношення не більше 3, а саме 3 пари по два однакових зразка колон з однаковою товщиною облицювання;

- 8 (вісім), коли таке відношення більше 3, а саме 4 пари по два однакових зразка колон з однаковою товщиною облицювання;

Оцінювання результатів випробувань проводиться методом лінійної числової регресії за додатком Ж ДСТУ Б В.1.1 – 17:2007 [8] з урахуванням незмінної зведеної товщини колони, проектної температури 500 °С (приріст температури відносно початкової на 480 °С) та різної товщини облицювання. Рівняння лінійної числової регресії може бути розширено на складову  $a_3 d_p^2$  (враховує нелінійність залежності вогнестійкості від товщини облицювання).

В якості прикладу розглянемо випробування сталевих колон (6 шт.) двотаврового перерізу зведеною товщиною 3,4 мм, на які було нанесено вогнезахисне покриття (облицювання) із плит вогнезахисних «Аммокот FB-300», виробництва ТОВ «КОВЛАР ГРУП». Випробування було виконано у випробувальному центрі ТОВ «ТЕСТ» в 2017 р. Сталеві колони мали двотавровий переріз з профілю №20 за ГОСТ 8239-89 зведеною товщиною 3,4 мм (коробчастою зведеною товщиною - 4,5 мм).

Зразки №1 та №2 були облицьовані в один шар з плит «Аммокот FB-300» завтовшки 25 мм. Зразки №3 та №4 були облицьовані у один шар з плит «Аммокот FB-300» завтовшки 30 мм. Зразки №5 та №6 були облицьовані у два шари з плит «Аммокот FB-300» завтовшки 30 мм (загальна товщини облицювання - 60 мм).

Відношення максимального і мінімального значення товщини покриття на зразках №1-№6 не перевищувало 3.

Закріплення плит на колонах між собою (див. додаток А) здійснювалося у торці за допомогою саморізів (крок 200 мм) з нанесенням (на торці) клею «Аммокот КС» шаром 1 мм.

До нанесення облицювання на кожній колоні згідно до ДСТУ Б В.1.1-14:2007 [9] встановлювалося по три термопари ТХА.

Для випробувань використовувались спеціальна випробувальна піч №2 та спеціальні засоби вимірювальної техніки.

Температура та надлишковий тиск у печі відповідали вимогам, що регламентовані стандартом. Надлишковий тиск у печі на 5-й хв. складав 8 Па, а починаючи з 10-ї хв. – 12 Па.

Втрата несучої здатності зразка №1 (периодичення середньої температури сталеві колони значення її початкової температури на 480<sup>0</sup>С) відбулася на 83 хв. випробувань.

Втрата несучої здатності зразка №2 відбулася на 82 хв. випробувань.

Втрата несучої здатності зразка №3 відбулася на 93 хв. випробувань.

Втрата несучої здатності зразка №4 відбулася на 93 хв. випробувань.

Втрата несучої здатності зразка №5 відбулася на 204 хв. випробувань.

Втрата несучої здатності зразка №6 відбулася на 206 хв. випробувань.

Обробка результатів випробувань здійснена згідно з додатком Ж ДСТУ Б В.1.1 – 17:2007 [8]. Обробці піддавалися одночасно результати випробувань зразків №1 - №6.

Рівняння для приросту температури  $\Delta T=480$  °С (проектна температура 500 °С) має вигляд:

$$t = 60,965 - 0,2896 \times d + 0,043907 \times d^2 \quad (6)$$

де  $d$  – товщина облицювання, мм.

На основі проведених досліджень рекомендовані відповідні значення товщин облицювання з плит «Аmmokote FB-300», які забезпечують певні класи вогнестійкості (R) сталевих колон зведеною товщиною металу не менше 3,4 мм для діапазону проектних температур 350 - 525 °С.

В рекомендаціях враховано розширення діапазонів товщин облицювання  $d \pm 5\%$  та проектних температур  $T + 5\%$  згідно вимог п. 13.2 ДСТУ Б.В.1.1-17:2007 [8].

**Висновки і перспективи подальшого розвитку.**

1. Розрахунок будівельних конструкцій на вогнестійкість (окремої конструкції, ча-

стини конструктивної системи або конструктивної системи в цілому) у відповідності з вимогами ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 [4] враховує такі етапи:

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

2. Граничним станом за ознакою втрати несучої здатності для сталевих конструкцій, які випробуються під навантаженням, є обвалення зразка або виникнення граничних значень температур для арматури і сталі сталевих колон із вогнезахисним облицюванням. При цьому, за температуру, при якій арматура (сталь конструкцій) не може виконувати свої функції, приймають температуру 500 °С.

3. Для колон, які випробовуються без навантаження, час досягнення граничного стану за ознакою втрати несучої здатності визначають за даними вимірювань температури по товщині зразка розрахунковим методом, який має відповідати вимогам ДБН В.1.1-7:2016 [3].

4. Розрахунок будівельних конструкцій на вогнестійкість включає прикладання впливів для теплового аналізу та впливів для механічного аналізу.

5. В ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 [4] наведено настанови щодо розрахунку та прийняття заходів для забезпечення вогнестійкості конструкцій, але не наведено вимог щодо визначення технічного стану сталевих конструкцій будівель та споруд і необхідності його регулювання після впливу високих температур при пожежі.

6. Для сталевих конструкцій необхідно розробити методи визначення параметрів вогнезахисних заходів для забезпечення тривалої та надійної експлуатації, а також комплекс взаємозв'язаних заходів щодо визначення параметрів технічного стану після силових і температурних впливів.

## Бібліографічний список

1. Мосалков И. Л. Огнестойкость строительных конструкций / И. Л. Мосалков, Г. Ф. Плюснина, А. Ю. Фролов. – М.: Спецтехника, 2001. – 484 с.
2. ДСТУ Б В.1.1-4-98\*. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. – Уведено вперше. – К.: Держбуд України, 2005. – 19 с.
3. ДБН В.1.1-7:2016. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва / Держбуд України. – К.: Держбуд України, 2017. – 35 с.
4. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016. Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. – Прийнято та надано чинності: наказ Мінрегіону України від 14.06.2016 року № 155. Набрання чинності з 01.04.2017 р. – К.: Мінрегіон України, 2016. – 147 с.
5. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування / Мінбуд України. – К.: Мінбуд України, 2006. – 60 с.
6. Маладика І. Г. Визначення технічного стану будівель зі сталевим каркасом після силових та високотемпературних впливів / І. Г. Маладика, І. М. Шкарабура // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. – К.: Видавництво «Сталь», 2016. – № 17. – С. 15–26.
7. ДБН В.2.6-198:2014. Державні будівельні норми України. Сталеві конструкції. Норми проектування / Мінрегіон України. – К.: Мінрегіон України, 2014. – 199 с.
8. ДСТУ Б В.1.1-17:2007 (ENV 13381-4:2002, NEQ). Вогнезахисні покриття для будівельних несучих металевих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності. – Введено вперше. Прийнято та надано чинності: наказ Міністерства регіонального розвитку та будівництва України від 22 червня 2007 р. № 65. – К.: Мінрегіонбуд України, 2007. – 65 с.
9. ДСТУ Б В.1.1-14:2007 (EN 1365-4:1999, NEQ). Колони. Метод випробування на вогнестійкість. – Введено вперше. Прийнято та надано чинності: наказ Міністерства регіонального розвитку та будівництва України від 22 червня 2007 р. № 63. – К.: Мінрегіонбуд України, 2007. – 20 с.
10. ДСТУ Б В.1.1-13:2007 (EN 1365-3:1999, NEQ). Балки. Метод випробування на вогнестійкість. – Введено вперше. Прийнято та надано чинності: наказ Міністерства регіонального розвитку та будівництва України від 22 червня 2007 р. № 64. – К.: Мінрегіонбуд України, 2007. – 10 с.

*Рекомендована до друку*

*д.т.н., проф. ТОВ «Укрінсталькон ім. В. М. Шимановського» Голодновим О. І.,  
д.т.н., проф. ПНТУ ім. Ю. Кандратюка Семко О. В.*

Стаття надійшла до редакції 09.01.2018

**к.т.н. Маладика І. Г., ад'юнкт Шкарабура І. Н.**

(ЧИПБ імені Героїв Чернобыля НУГЗ, г. Черкаси, Україна)

### **ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОГНЕСТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

*В статье изложены методические подходы применительно к расчету стальных конструкций на огнестойкость, приведены практические методы определения огнестойкости стальных конструкций зданий и сооружений. Научной новизной можно считать предложения по практическому использованию методов определения огнестойкости стальных конструкций, в том числе и для оценки их технического состояния после пожара.*

**Ключевые слова:** *стальные конструкции, температурные воздействия, огнестойкость, техническое состояние.*

**PhD in Technical Sciences Maladyka I.G., adjunct Shkarabura I.M.**

(Cherkasy Institute of Fire Protection the name of the Heroes of Chernobyl of NUCD, Cherkasy, Ukraine)

## **PRACTICAL DEFINITIONAL METHODS OF FIRE RESISTANCE OF STEEL CONSTRUCTIONS**

*The article describes methodical approaches for the calculation of steel structures for fire resistance, practical methods for determining the fire resistance of steel constructions of buildings and structures are given. Scientific novelty can be considered proposals for the practical use of methods for determining the fire resistance of steel structures, including for assessing their technical condition after the fire.*

**Key words:** *steel constructions, temperature effects, fire resistance, technical condition.*