

Ю.М. Данченко¹, Є.В. Качкар², Н.В. Рашкевич³¹Національна академія національної гвардії України, Україна²Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Україна³Національний університет цивільного захисту України, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЧИННИКІВ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ ПЕРЕГОРОДОК ІЗ СЕНДВІЧ-ПАНЕЛЕЙ

У роботі проведено дослідження теплових процесів у перегородках при односторонньому впливі пожежі. Представлено удосконалену математичну модель теплопровідності в перегородках. Відмінність даної моделі від вже існуючих полягає в застосуванні коефіцієнтів тепловіддачі з необігрівної поверхні перегородки в граничних умовах. Розглянуто нелінійний конвективний і радіаційний теплообмін.

Ключові слова: вогнестійкість, методичне забезпечення, параметри, моделювання.

Постановка проблеми

Широке застосування вогнестійких будівельних конструкцій під час проектування потребує інформації про їхню вогнестійкість. Однією з таких конструкцій є тришарові перегородки з вогнестійким внутрішнім заповненням, що застосовуються при будівництві виробничих та торгових споруд, адміністративних та спортивних комплексів, будівель аеропортів, терміналів, ангарів, а також для холодильних та морозильних камер. Конструктивне улаштування сендвіч-панелей представлено на рис. 1.

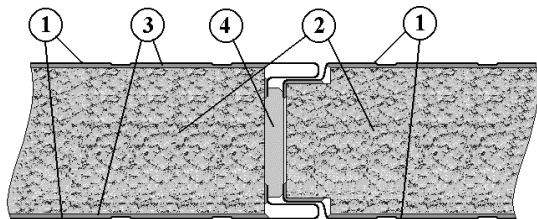


Рис. 1. Тришарова будівельна конструкція:

- 1 – зовнішня та внутрішня обкладки з оцинкованого сталевих листа товщиною 0,5 мм з лакофарбовим покриттям; 2 – утеплювач із мінеральної вати; 3 – поліуретановий клей; 4 – ущільнювальна прокладка з мінеральної вати.

У питаннях забезпечення пожежної безпеки будівель та споруд, де використовуються перегородки з сендвіч-панеллю, першочерговим завданням їх застосування є визначення межі вогнестійкості перегородок, для чого при тепловому проектуванні вогнестійких конструкцій, що

захищають, необхідно знання залежності мінімальної товщини перегородки від необхідної межі вогнестійкості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Основну увагу науковці приділяють питанням підвищення вогнестійкості. Маючи велику кількість переваг, сендвіч-панелі характеризуються низькою межею вогнестійкості, що створює великий ризик при рятуванні людей і матеріальних цінностей у випадку пожежі [1]. Середня межа вогнестійкості складає 3–5 хвилин [2].

В роботі [3] експериментально підтверджено ефективність використання вермикулітосилікатних плит для підвищення вогнестійкості сендвіч-панелей. Зазначено, що методики визначення межі вогнестійкості, які використовуються та регламентовані стандартами України є наближені до відповідних Європейських стандартів та враховують положення Директиви 89/106 ЕЕС і мають ряд недоліків, що пов'язані із складністю, та багатошаровістю конструкцій. Оцінюють вогнезахисні покриття, їх товщини для нормованих класів вогнестійкості сталевих конструкцій [4].

Аналіз теплового стану багатошарових перегородок з мінераловатними плитами та розробка рекомендацій для проектування будівель з таких конструкцій, можливий за допомогою моделювання теплових процесів, що відбуваються при вогневому впливі на досліджувані зразки.

Для математичного обчислення процесу тепломасообміну у вогневих печах нині використовують інтегральні, зонні та польові моделі. Використовують фундаментальні рівняння Нав'є-Стокса, рівняння нерозривності потоку,

рівняння Фур'є-Кіргофа, рівняння стану газу, рівняння дифузії, тощо.

Існує певна кількість моделей теплового стану багат шарових перегородок з мінераловатними плитами різного рівня складності та призначення [5, 6]. Однак у цих моделях присутні параметри, які є індивідуальними для кожної перегородки і відомі з недостатньою точністю.

Формулювання мети статті

Метою дослідження є визначення впливу коефіцієнта тепловіддачі (α_{c2}) від металеві поверхні в повітря від поверхні, що не обігривається, перегородки, яка забезпечує достовірність розрахунків залежності мінімальної товщини перегородки від необхідної межі вогнестійкості.

Реалізація даної мети можлива з використанням так званих методичних (тестових) задач, в яких зміна температур зразків під час вогневих випробувань замінюється обчислювальним експериментом.

Виклад основного матеріалу

Точність розрахунку теплового режиму багат шарових перегородок значною мірою визначається точністю завдання параметрів моделі, що забезпечує її адекватність реальним процесам теплообміну при вогневих випробуваннях. Це параметри: коефіцієнт тепловіддачі від гарячих газів до металеві поверхні, що нагрівається (α_{c1}),

коефіцієнт тепловіддачі від металеві поверхні в повітря з поверхні перегородки, що не обігривається (α_{c2}), коефіцієнт випромінювання металеві листа перегородки (ϵ), коефіцієнт теплопровідності (λ) та питома об'ємна теплоємність (C_v). Якщо параметри коефіцієнтів тепловіддачі від гарячих газів до металеві поверхні, що нагрівається, і випромінювання металеві листа перегородки можливо оцінити, то величини коефіцієнтів тепловіддачі від металеві поверхні в повітря з необігривної поверхні перегородки, теплопровідності та питомі об'ємної теплоємності багат шарових перегородок, можливо ідентифікувати тільки за даними експериментального вимірювання температур при вогневих випробуваннях. Під ідентифікацією розуміється знаходження таких значень параметрів теплової моделі, які забезпечують близькість експериментальних та розрахункових значень температур під час розв'язання прямих та обернених задач теплопровідності. Серед параметрів моделі ідентифікувати необхідно ті, які є невідомими або недостатньо відомими та найбільше впливають на розрахункові значення температур обраної моделі.

У тестових задачах, схема розв'язання яких представлена на рис. 2, параметри моделі задані та розв'язання прямих задач теплопровідності (ПЗТ) визначається нестационарний температурний розподіл у досліджуваному об'єкті.

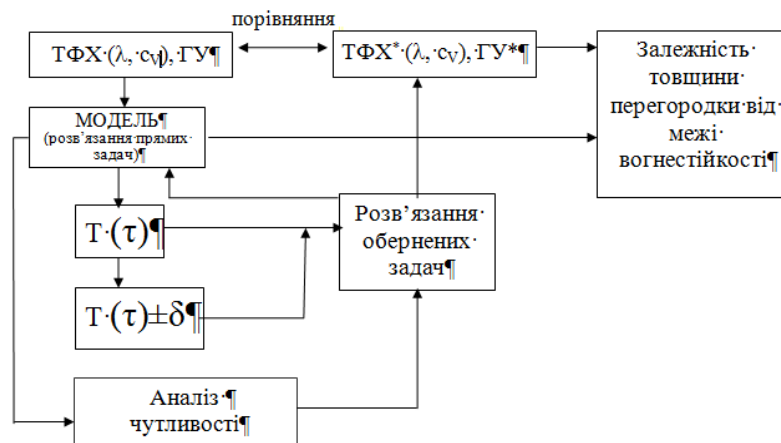


Рис. 2. Схема розв'язання тестових (методичних) задач.

Отримані температури збурюються, імітуючи помилки при їх вимірюванні, і за температурами з похибками $T(\tau) \pm \tau$ оберненими задачами теплопровідності (ОЗТ) визначаються параметри та порівнюються із заданими. Це дає можливість визначення параметрів із необхідною точністю, а також дозволяє встановити залежність товщини перегородки від необхідної межі вогнестійкості.

Доцільність такого аналізу диктується також необхідністю забезпечення максимально можливої інформативності та достовірності одержуваних експериментальних даних при мінімально можливій кількості експериментів, що проводяться. Для визначення впливу даного коефіцієнта на залежність товщини перегородки від межі вогнестійкості вирішено ряд тестових завдань, в яких імітувалися

зміни даного коефіцієнта (в межах 10–20 %) при випробуванні.

З метою спрощення розрахунків конвективного теплообміну в приміщенні, де проводяться випробування, приймають припущення, що температура повітря в кожний момент часу однакова по всьому об'єму приміщення. Таким чином, розрахунок конвективного теплообміну в приміщенні зводиться до обчислення конвективних теплових потоків між поверхнями випробуваних зразків і повітрям, що омивають (обдувають) ці поверхні, за формулою (1):

$$Q_k = \alpha_k (\tau_{e.n.} - t_e) F, \quad (1)$$

де α_k – коефіцієнт конвективної тепловіддачі між поверхнею і повітрям, що її омиває; $\tau_{e.n.}$, t_e – відповідно температура поверхні зразка та повітря; F – площа поверхні зразків, що омивається повітрям.

Особливості конвективного теплообміну в приміщенні враховує емпірична формула (2) для розрахунку коефіцієнта конвективної тепловіддачі, запропонована В.М. Богословським [7]:

$$\alpha_k = A \sqrt[3]{|t_b - t_{в.п.}| + 60 \frac{v_b^2}{l} \pm \frac{1}{2} c_\phi j_\phi}, \quad (2)$$

де A – емпіричний коефіцієнт, який в умовах приміщення для вертикальних поверхонь дорівнює

1,66, для горизонтальних поверхонь при русі теплових потоків знизу догори дорівнює 2,16; при русі теплових потоків зверху вниз дорівнює 1,16; v_b – загальна рухливість повітря у приміщенні; l – характерний розмір поверхні приміщення; c_ϕ – питома теплоємність повітря; j_ϕ – витрата повітря, що фільтрується, через одиницю поверхні огорожі.

Параметр j_ϕ у правій частині рівняння (2) враховує вплив на коефіцієнт конвективного теплообміну повітря, який відбувається, як правило, взимку через зовнішні огорожі. При ексфільтрації цей член приймається зі знаком «плюс», при інфільтрації – зі знаком «мінус».

Проведений вище аналіз показує, що для достовірного опису теплових процесів у перегородці при вогневому впливі необхідно максимально точно описувати теплообмін на поверхні перегородки, яка не обігривається. Оскільки температура на цій поверхні під час вогневого випробування досягає 180 °С і вище, необхідно враховувати змішаний радіаційно-конвективний теплообмін.

Встановлено [6], що α_{c2} – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні, що не обігривається, перегородки, значно впливає на температуру поверхні сендвіч-панелі, яка піддається вогневому випробуванню. Такі залежності коефіцієнта тепловіддачі від температури за різних режимів представлені на рис. 3.

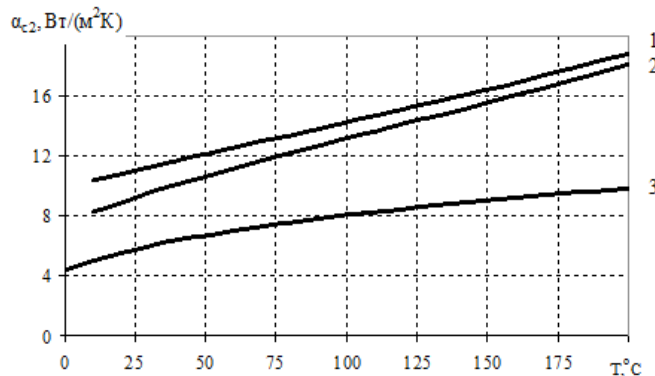


Рис. 3. Залежність коефіцієнту тепловіддачі α_{c2} від температури лежить на поверхні перегородки: 1 – конвективно-радіаційний теплообмін за швидкості повітря 2 м/с; 2 – конвективно-радіаційний теплообмін за швидкості повітря 1 м/с; 3 – конвективний теплообмін при швидкості повітря 1 м/с.

Очевидно, що у вибраних залежностях значення коефіцієнта тепловіддачі α_{c2} у рази (до 4-х разів) відрізняється від значення, рекомендованого Єврокодами [8], у цій роботі цей коефіцієнт становив $\alpha_{c2} = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$. Для конвективно-

радіаційного теплообміну всередині приміщення використовувалася формула (3), ліве доданок залежності описує конвективний теплообмін, праве – радіаційний теплообмін.

$$\alpha_{c2} = 1,66 (|T(X, t) - T_{c2}| + \frac{60 v_b^2}{h})^{0,33} + \varepsilon C_0 \left[\left(\frac{T(X, t)}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{c2}}{100} \right)^4 \right] / T(X, t) - T_{c2}, \quad (3)$$

де 1,66 – коефіцієнт для вертикальних поверхонь; $v_v = 0,35 \div 0,65$ – швидкість повітря всередині приміщення; $h = 3,2$ м – характерний розмір для випробуваних зразків, $C_0 = 5,67$; $\varepsilon = 0,65$ [9].

Запропонована залежність і дозволила отримати найбільш точний результат, за якого критерій середньоквадратичного відхилення температур при розв’язанні обернених задач теплопровідності становив ≤ 1 . При цьому визначення коефіцієнта α_{C2} зводилося до уточнення швидкості (рухливості) повітря v_v на поверхні перегородки.

З урахуванням, поданих на рис. 3 залежностей, вирішені зворотні завдання теплопровідності, в результаті яких отримані параметри коефіцієнтів теплопровідності та питомої об’ємної теплоємності, а також показано вплив зміни коефіцієнта тепловіддачі від металевої поверхні в повітря на поверхні перегородки, що не обігривається, на ТФХ досліджуваної сендвіч-панелі. Значення α_{C2} змінювалося від вихідного на - 10 % та 20 %,

імітуючи неточності при заданні цього параметра у вихідній умові.

Знаходження залежності товщини досліджуваної перегородки від межі вогнестійкості (рис. 6) при $\alpha_{C2} = f(T)$ і постійних значеннях ТФХ: $C_v = const$, $\lambda = const$ (як вихідні дані взято результати вогневих випробувань перегородки з товщиною сендвіч-панелі – 60 мм):

1) при $C_v = f(T)$, $\lambda = f(T)$, $\alpha_{C2} = f(T)$, середньоквадратичне відхилення температур $\Phi = 0,57$ (результат – крива 1 рис. 4–6);

2) при $C_v = const$, $\lambda = f(T)$, $\alpha_{C2} = f(T)$, середньоквадратичне відхилення температур $\Phi = 1,831$ (результат – крива 2 рис. 4–6);

3) при $\lambda = const$, $C_v = const$, $\alpha_{C2} = f(T)$, середньоквадратичне відхилення температур $\Phi = 16,202$ (результат – крива 3 рис. 4–6);

4) при $\lambda = f(T)$, $C_v = f(T)$, $\alpha_{C2} = 8$ Вт/(м²К), середньоквадратичне відхилення температур $\Phi = 12,4$ (результат – крива 4 рис. 6).

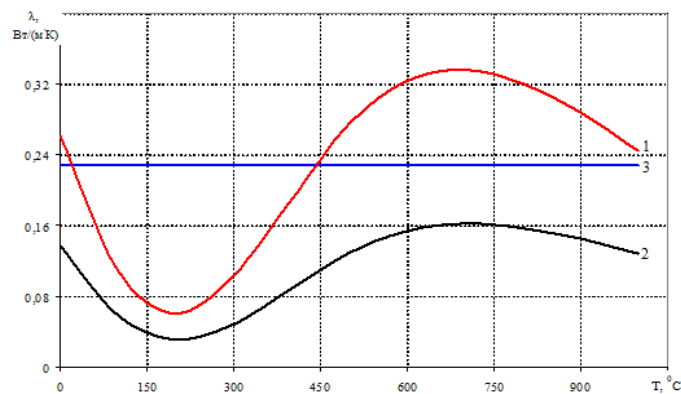


Рис. 4. Залежності коефіцієнта теплопровідності від температури, отримані при розв’язанні ОЗТ, для перегородки з товщиною сендвіч-панелі 60 мм – крива 1 (точна), крива 2 – при $C_v = const$, $\lambda = f(T)$, $\alpha_{C2} = f(T)$; крива 3 – $\lambda = const$, $C_v = const$, $\alpha_{C2} = f(T)$.

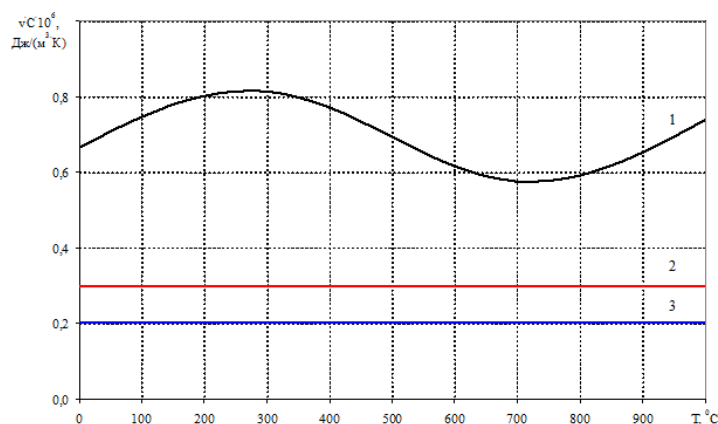


Рис. 5. Залежності питомої об’ємної теплоємності від температури, отримані при розв’язанні ОЗТ, для перегородки товщиною 60 мм: крива 1 (точна), крива 2 – при $C_v = const$, $\lambda = f(T)$, $\alpha_{C2} = f(T)$; крива 3 – $\lambda = const$, $C_v = f(T)$, $\alpha_{C2} = f(T)$.

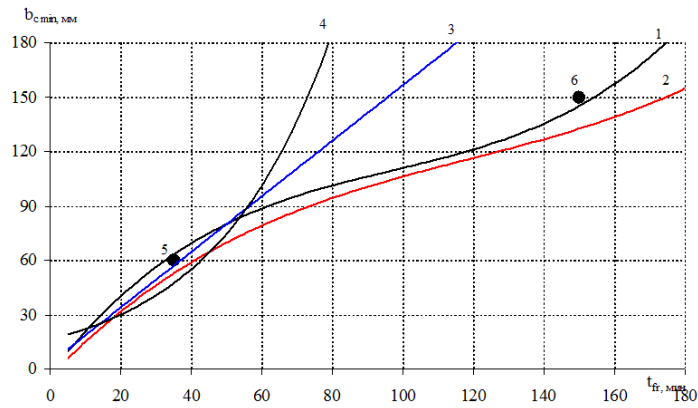


Рис. 6. Залежність товщини перегородки від межі вогнестійкості при розв'язанні ПЗТ: крива 1(точна), крива 2 – при $C_v = f(T)$, $\lambda = f(T)$, $\alpha_{C2} = f(T)$; крива 3 – $\lambda = const$, $C_v = const$, $\alpha_{C2} = f(T)$, крива 4 – при $C_v = f(T)$, $\lambda = f(T)$, $\alpha_{C2} = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ відповідно до [6], точка 5 і 6 – межа вогнестійкості перегородки SANDWICHROCK фірми ROCKWOOL товщиною 60 та 150 мм, отримані експериментальним шляхом.

Проаналізувавши результати випробувань (точки 5 і 6 на рис. 6) та розрахункових меж вогнестійкості для перегородок із сендвіч-панелей SANDWICHROCK фірми ROCKWOOL товщиною 60 та 150 мм (крива – 1), можна констатувати їхню задовільну збіжність. Розрахункові значення межі вогнестійкості перегородки від експериментальних значень на 4%. Крива 4 рис. 6 – залежність, отримана при постійних значеннях $\alpha_{C2} = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, при цьому критерій середньоквадратичного відхилення при вирішенні ОЗТ становив $10,8 \text{ }^\circ\text{C}$, а розбіжність розрахункових та експериментальних значень вогнестійкості становила близько 30%.

Висновки

Порівняння меж вогнестійкості для перегородки із сендвіч-панелі товщиною 60 мм SANDWICHROCK фірми ROCKWOOL, представлених на рис. 6, свідчать про сильний вплив точності задавання параметра α_{C2} на залежність товщини перегородки від межі вогнестійкості. Розрахункові значення межі вогнестійкості перегородки із заданими параметрами: $C_v = f(T)$, $\lambda = f(T)$, $\alpha_{C2} = f(T)$ відрізняються на 30% від спрощеного, де застосовані постійні значення.

У роботі проведено дослідження теплових процесів у перегородках із сендвіч-панелей при односторонньому вогневому впливі. Науково обґрунтовано точність завдання параметра α_{C2} на залежність товщини перегородки від межі вогнестійкості, які показали сильний вплив граничної умови, що описує процеси теплопередачі на поверхні перегородки, що не обігрівається, на точність визначення меж вогнестійкості досліджуваної конструкції.

На думку авторів, вплив точності завдання параметра – коефіцієнта теплопередачі від об'єкта до навколишнього середовища, на вогнестійкість досліджуваних будівельних конструкцій, які при випробуванні схильні як до природної (рухливості) повітря, так і примусового обдування, як, наприклад, при випробуваннях повітроводів з вогнезахистом, необхідно враховувати конвективно-радіаційний теплообмін, що дозволить отримати найбільш точний результат щодо визначення їх характеристики вогнестійкості.

Література

1. Експериментальне дослідження вогнестійкості огорожувальних конструкцій з гіпсокартонними плитами [Текст] / Р.Б. Веселівський, Р.С. Яковчук, О.О. Василенко, П.В. Семенюк // *Пожезна безпека: зб. наук. праць.* – 2015. – № 26 – С. 19–26.
2. Експериментальне дослідження вогнестійкості багатошарових огорожувальних конструкцій [Текст] / А.П. Половко, Р.Б. Веселівський, О.О. Василенко, Ю.С. Шелюх // *Пожезна безпека: зб. наук. праць.* – 2011. – № 19. – С. 118–123.
3. Шерстинюк, Н.Л. Обґрунтування ефективності використання вермикулітосилікатних плит для підвищення вогнестійкості сендвіч-панелей [Текст] / Н.Л. Шерстинюк, В.Б. Лоїк // *Пожезна безпека: зб. наук. праць.* – 2014. – №25. – С. 96–102.
4. Новак, С.В. Оцінювання вогнезахисних властивостей покриттів і облицювань для сталевих конструкцій [Текст] / С.В. Новак, В.Л. Дріжд, О.В. Добрян // *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека.* – 2021. – № 2(12). – С 43–53.
5. Круковский, П.Г. Идентифицируемость параметров модели теплового режима типовой двухкомнатной квартиры конструкций [Текст] / П.Г. Круковский, О.Ю. Тадия // *Промышленная теплотехника.* – 2007. – № 5. – С. 54–63.
6. Качкар, Е.В. Идентифицируемость параметров модели теплового состояния сэндвич-панелей с минераловатными плитами [Текст] / Е.В. Качкар // *Проблемы пожарной безопасности.* – 2010. – Вып.27. – С.70-76.

7. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) [Текст]. – 1970. – 376 с.

8. EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.

References

1. Veselivskiy, R.B., Yakovchuk, R.S., Vasylenko, O.O., Semenyuk, P.V. (2015). Experimental study of fire resistance of enclosing structures with plasterboard plates. *Fire safety: coll. of science works*, (26), 19–26.

2. Polovko, A.P., Veselivskiy, R.B., Vasylenko, O.O., Husk, Yu.E. (2011). Experimental study of fire resistance of multi-layer enclosing structures. *Fire safety: coll. of science works*, (19), 118–123.

3. Sherstinyuk, N.L., Loik, V.B. (2014). Rationale for the effectiveness of using vermiculite silicate boards to increase the fire resistance of sandwich panels. *Fire safety: coll. of science works*, (25), 96–102.

4. Novak, S.V., Drizhd, V.L., Dobrostan, O.V. (2021). Evaluation of fire-resistant properties of coatings and facings for steel structures. *Scientific Bulletin: Civil defense and fire safety*, 2(12), 43–53.

5. Krukovsky, P.G., Tadlya, O.Yu. (2007). Identifiability of the parameters of the thermal regime model of a typical two-room apartment structure. *Industrial Heat Engin.*, (5), 54–63.

6. Kachkar, E.V. (2010). Identifiability of the parameters of the thermal state model of sandwich panels with mineral wool boards. *Problems of Fire Safety*, (27), 70–76.

7. Bogoslovsky, V.N. (1970). *Building thermophysics (thermophysical fundamentals of heating, ventilation and air conditioning)*, 376.

8. EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.

Рецензент: д.т.н., професор А.В. Кондратьев, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна.

Автор: ДАНЧЕНКО Юлія Михайлівна
доктор технічних наук, професор, професор кафедри фундаментальних дисциплін
Національна академія національної гвардії України
E-mail – yuliyadanchenko7@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3865-2496>

Автор: КАЧКАР Євген Володимирович
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри організації заходів цивільного захисту
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України
E-mail – kachkar@ukr.net
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9064-8967>

Автор: РАШКЕВИЧ Ніна Владиславна
PhD, викладач кафедри пожежної профілактики в населених пунктах
Національний університет цивільного захисту України
E-mail – nine291085@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5124-6068>

INVESTIGATION OF INFLUENCE OF FACTORS ON FIRE RESISTANCE OF PARTITIONS MADE OF SANDWICH PANELS

Y. Danchenko¹, Y. Kachkar², N. Rashkevich³

¹National Academy of the National Guard of Ukraine, Ukraine

²Cherkassy institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine

³National University of Civil Defence of Ukraine, Ukraine

The authors describe the results of studies of thermal processes in partitions made of sandwich panels under one-sided influence of fire.

Analysis of the thermal state of multilayer partitions with mineral wool plates and development of recommendations for the design of buildings from such structures is possible using the simulation of thermal processes that occur during fire exposure to the studied samples. There is a certain number of models of the thermal state of multilayer partitions with mineral wool plates of different levels of complexity and purpose. However, in these models there are parameters that are individual for each partition and are known with insufficient accuracy.

The authors provided an improved mathematical model of heat conduction in partitions, the difference of which is the application of heat transfer coefficients from the unheated surface of the partition in boundary conditions. A comparison of the fire resistance limits for a partition made of a sandwich panel indicates a strong influence of the accuracy of setting the heat transfer coefficient on the dependence of the thickness of the partition on the fire resistance limit. The accuracy of the task of the heat transfer coefficient on the dependence of the thickness of the partition on the fire resistance limit was scientifically substantiated, which showed a strong influence of the boundary condition describing the processes of heat transfer on the surface of the partition, which is not heated, on the accuracy of determining the limits of fire resistance of the structure under study. The influence of the accuracy of the assignment of the coefficient of heat transfer from the object to the environment on the fire resistance of the investigated building structures, which during the test are subject to both natural (mobility) of air and forced blowing, as, for example, during tests of air ducts with fire protection, must be taken into account convectively radiation heat exchange, which will allow to obtain the most accurate result regarding the determination of their fire resistance characteristics.

Keywords: fire-resistance, methodological support, parameters, modeling.