

Технічні науки

УДК 614.841.45

Ніжник Вадим Васильович

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
начальник науково-дослідного центру технічного регулювання
Український науково-дослідний інститут цивільного захисту*

Нижник Вадим Васильевич

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
начальник научно-исследовательского центра технического регулирования
Украинский научно-исследовательский институт гражданской защиты*

Nizhnyk Vadim

*Candidate of Technical Sciences, Senior Staff Scientist,
Head of Research Centre of Technical Regulation
The Ukrainian Civil Protection Research Institute*

**АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ МЕТОДІВ
ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ МІЖ БУДИНКАМИ ТА
СПОРУДАМИ ПІД ЧАС ПОЖЕЖІ
АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ МЕЖДУ
ЗДАНИЯМИ И СООРУЖЕНИЯМИ ВО ВРЕМЯ ПОЖАРА
ANALYSIS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL METHODS OF
RESEARCH OF HEAT TRANSFER BETWEEN BUILDINGS AND
STRUCTURES IN CASE OF FIRE**

Анотація. На сьогоднішній день виникла необхідність розроблення повноцінного розрахункового методу визначення протипожежних відстаней між будівельними об'єктами. Метою даного дослідження є аналіз існуючих методів досліджень теплових впливів між спорудами та

визначення доцільності їх застосування з врахуванням сучасних тенденцій розвитку будівництва.

Ключові слова: *теплопередача, теплота, температура, густина теплового потоку.*

Аннотація. *На сьогоднішній день виникла необхідність розробки полноценного расчетного метода определения противопожарных расстояний между строительными объектами. Целью данного исследования является анализ существующих методов исследований тепловых воздействий между сооружениями и определения целесообразности их применения с учетом современных тенденций развития строительства.*

Ключевые слова: *теплопередача, теплота, температура, плотность теплового потока.*

Summary. *There was a need to develop a full-fledged calculation method for determining fire-fighting distances between construction objects. The purpose of this study is to analyze the existing methods for studying thermal effects between structures and determining the feasibility of their use in the light of current trends in the construction.*

Key words: *heat transfer, heat, temperature, density of heat flow.*

Постановка проблеми. З розвитком сучасного комп'ютерного програмного забезпечення виникла можливість розв'язання складних задач пов'язаних з процесами теплопередачі між будинками та спорудами під час пожежі. У зв'язку з цим з'явилася можливість розроблення повноцінного розрахункового методу визначення протипожежних відстаней між будівельними об'єктами. На сьогодні в діючій нормативній базі відсутній зарегламентований такий метод. Це значно ускладнює

роботи при проектуванні суміжних споруд й часто призводить до прийняття помилкових рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В основу метода обґрунтування протипожежних відстаней між будинками покладено класичну теорія теплообміну випромінювання. На даний час відомий значний обсяг досліджень присвячених процесам теплопередачі. Так, дослідженнями теплопередачі періодичних коливань крізь стіни здійснювалися Шкловером А.М. [1], розроблення математичних моделей теплового балансу будівель відображено в працях Табунщикова Ю.А. [2]. Побудова математичних моделей нестационарного теплового режиму споруд викладена в працях Нагорної А.Н. [3]. Явище променистого теплообміну має бути враховане під час обґрунтування протипожежних відстаней між будинками як показано в працях [4-6].

Проведений аналіз наукових праць показав, що багато дослідників у різні часи вивчали процеси теплопередачі у будинках, однак проведених ними досліджень недостатньо для розроблення розрахункового методу визначення протипожежних відстаней.

Формулювання цілей досліджень. Метою даної статті є аналіз існуючих методів досліджень теплових впливів між спорудами та визначення доцільності їх застосування з врахуванням сучасних тенденцій розвитку будівництва. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- надати основні відомості щодо процесів теплопередачі;
- провести огляд існуючих теоретичних та експериментальних підходів дослідження теплопередачі між будівельними конструкціями споруд;
- провести огляд сучасних програмних комплексів для моделювання теплових процесів.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтування отриманих наукових результатів. Закони теплопередачі

набули широкого розповсюдження при вивченні та науковому обґрунтуванні вимог до межі вогнестійкості будівельних конструкцій, дослідженні їх поведінки в умовах пожежі, а також визначенні протипожежних відстаней між будинками і спорудами.

Теплопередача – це важливий фізичний процес, що передбачає перенесення теплоти і являє собою складний процес, що складається із сукупності простих перетворень.

Основні способи теплопередачі: конвекція, теплопровідність, теплове випромінювання.

Фізичну суть процесу теплопередачі доцільно показати на прикладі одношарової плоскої стіни (рис.1).

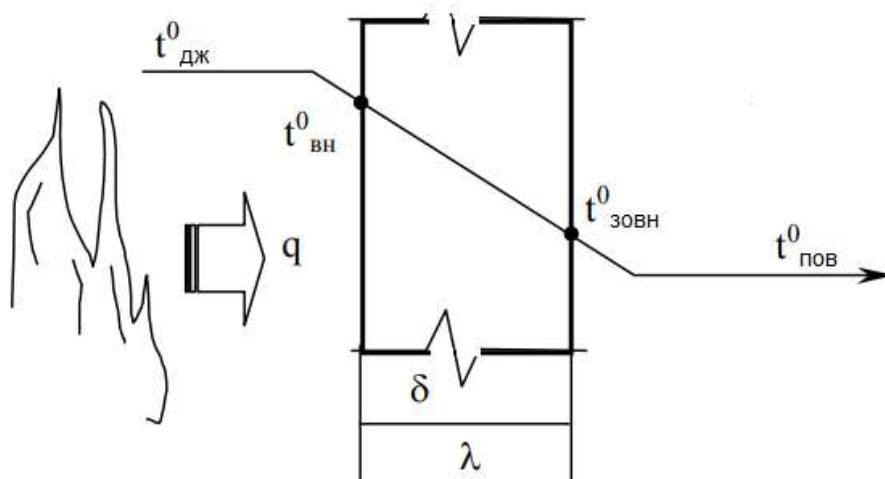


Рис. 1. Теплопередача через одношарову плоску стіну

З рис. 1 видно, що тепло сприймається поверхнею стіни, яка піддана прямому тепловому впливу від джерела тепла. Кількість цього тепла визначається за законом Ньютона:

$$Q = \alpha_b \tau (t_{дж}^0 - t_{вн}^0) \quad (1)$$

Тепло передається через стіну шляхом теплопровідності за законом Фур'є:

$$Q = \frac{\lambda F \tau (t_{вн}^0 - t_{зовн}^0)}{\delta} \quad (2)$$

Тепло віддається поверхнею, що протилежна джерелу теплової дії у навколишнє середовище визначається за законом Ньютона:

$$Q = \alpha_{от} F Q (t_{зовн}^0 - t_{пов}^0) \quad (3)$$

Зазначена схема передачі тепла на рис. 1 відображає найпростіший спосіб його передачі через будівельну конструкцію. Однак, сучасне будівництво вимагає більш точнішого та якіснішого представлення процесу передачі тепла з врахуванням всіх можливих особливостей будівельних конструкцій, а також способів їх розміщення відносно джерела теплового впливу.

Серед існуючих теоретичних методів проведення розрахунків теплових впливів для будівельних конструкцій єдиним стандартизованим є метод відображений в ДСТУ-Н EN 1991-1-2:2010 [7], тому на ньому слід зупинитися більш детально.

Теплові впливи для зовнішніх конструкцій в основному реалізуються за проведення спрощеного методу розрахунку. Даний метод дозволяє визначити:

- розміри й температуру полум'я із прорізів;
- параметри випромінювання й конвекції.

Метод розглядає умови, що встановилися для різних параметрів і застосовується тільки для пожежного навантаження $qf_{,d} > 200$ МДж·м².

Якщо в розглянутій пожежній секції більше одного вікна, то використовуються наведена по площі висота вікон heq , сумарна площа вертикальних прорізів A_v і сумарна ширина вікон на всіх стінах ($w_t = \sum wi$).

Якщо тільки одна стіна має вікна, то відношення D/W визначається по формулі [7]:

$$D/W = \frac{W_2}{w_t} \quad (4)$$

Якщо кілька стін мають вікна, то відношення D/W визначається по формулі [7]:

$$D/W = \frac{W_2}{W_1} \cdot \frac{A_{v1}}{A_v}, \quad (5)$$

де W_1 — ширина стіни 1 з максимальною площею вікон;

A_{v1} — сума площ вікон стіни 1;

W_2 — ширина стіни, перпендикулярній стіні 1, у пожежній секції.

Якщо зона горіння розташована безпосередньо в пожежній секції, то відношення D/W при дотриманні певних меж визначається по формулі [7]:

$$D/W = \frac{(W_2 - L_c)}{(W_1 - W_c)} \cdot \frac{A_{v1}}{A_v}, \quad (6)$$

де L_c, W_c — довжина й ширина вогнища відповідно;

W_1, W_2 — довжина й ширина пожежної секції відповідно.

Усі частини зовнішньої стіни, не відповідні до необхідної вогнестійкості (REI), розглядаються як вікна.

Сумарна площа вікон у зовнішній стіні приймається рівною:

— загальній площі, якщо вона менше 50 % площі відповідної зовнішньої стіни приміщення;

— спочатку загальної площі вікон, потім 50 % площі відповідної зовнішньої стіни, якщо площа вікон перевищує 50 % площі відповідної зовнішньої стіни. Обидві зазначені ситуації враховуються в розрахунках. Якщо розрахунки проводяться для 50 % площі зовнішньої стіни, то положення й геометрія прорізів вибираються для найбільш несприятливого випадку.

Розміри пожежної секції (відсіку) не повинні перевищувати 70 м по довжині, 18 м по ширині й 5 м — по висоті.

Температура полум'я приймається усереднено по його ширині й товщині.

Якщо на протилежних сторонах пожежної секції (відсіку) є вікна або повітря додатково надходить до пожежі від інших джерел (інших, чому вікна), то розрахунки виконуються з урахуванням примусової вентиляції.

Розрахунки проводяться для двох випадків виходу полум'я із прорізів (рис. 2):

- перпендикулярно до фасаду;
- з відхиленням 45° до фасаду внаслідок впливу вітру.

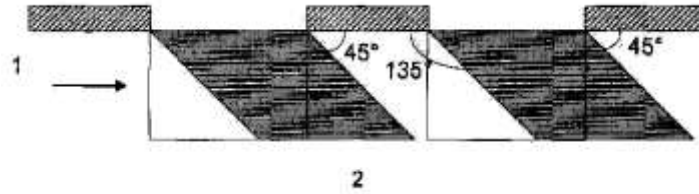


Рис. 2. Відхилення полум'я вітром: 1 - вітер; 2 - горизонтальна проекція

Потужність теплового потоку пожежі визначається по формулі [7]:

$$Q = \min \left\{ \frac{A_f \cdot q_{f,d}}{\tau_F}; 3,15 \cdot \left(1 - e^{-\frac{0,036}{0}} \right) \cdot A_v \cdot \left(\frac{h_{eq}}{D/W} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}, \text{ МВт.} \quad (7)$$

Температура в пожежній секції визначається по формулі [7]:

$$T_f = 6000 \sqrt{0} \cdot \left(1 e^{\frac{0,1}{0}} \right) \cdot \left(1 e^{0,00286 \Omega} \right) + T_0. \quad (8)$$

Висота полум'я (рис. 2) визначається по формулі [7]:

$$L_L = \max \left\{ 0; h_{eq} \cdot \left(2,37 \cdot \left(\frac{Q}{A_v \rho_g \sqrt{h_{eq} g}} \right)^{\frac{2}{3}} \right) - 1 \right\}. \quad (9)$$

Приймаючи $\rho_g = 0,45 \text{ кг} \cdot \text{м}^3$ і $g = 9,81 \text{ м} \cdot \text{с}^2$, формула (9) може бути спрощена:

$$L_L = 1,9 \cdot \left(\frac{Q}{w_t} \right)^{\frac{2}{3}} - h_{eq}. \quad (10)$$

Ширина полум'я приймається рівній ширині вікна (рис. 3).

Глибина полум'я приймається рівної 2/3 висоти вікна: $2/3 h_{eq}$ (рис. 3).

Горизонтальна проекція полум'я приймається:

- якщо є стіна над вікном:

$$L_H = \frac{h_{eq}}{3}, \quad \text{якщо } h_{eq} \leq 1,25 w_t; \quad (11)$$

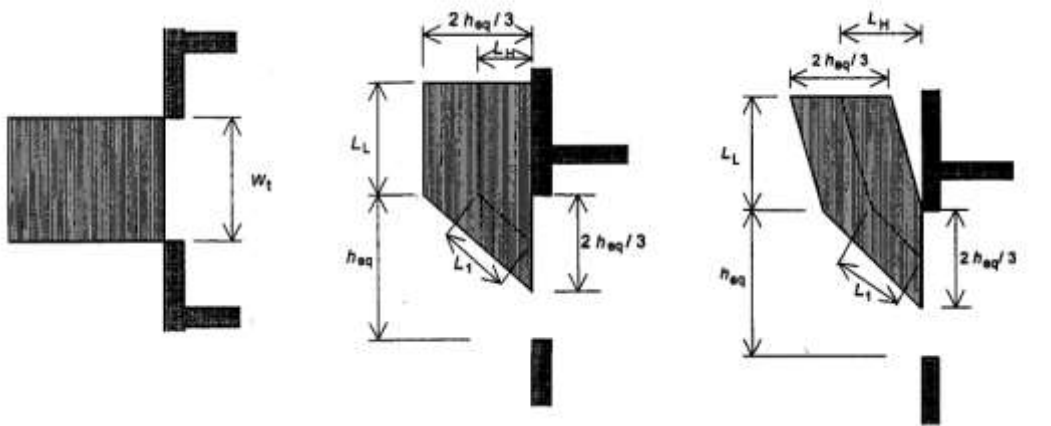
$$L_H = 0,3 h_{eq} \cdot \left(\frac{h_{eq}}{w_t} \right)^{0,54}, \quad \text{якщо } h_{eq} > 1,25 w_t \text{ і відстань}$$

до інших вікон $> 4 w_t$; (12)

$$L_H = 0,454 h_{eq} \cdot \left(\frac{h_{eq}}{2 w_t} \right)^{0,54} \quad \text{— в інших випадках;} \quad (13)$$

- якщо немає стіни над вікном:

$$L_H = 0,6 h_{eq} \cdot (L_L / h_{eq})^{1/3}. \quad (14)$$



Горизонтальний
поперечний переріз

$$L_L = \frac{h_{eq}}{3}$$

$$h_{eq} < 1,25 w_t$$

Вертикальний
поперечний переріз

$$L_1 = \sqrt{L_H^2 + \frac{h_{eq}^2}{9}} \cong \frac{h_{eq}}{2}$$

$$L_t = L_L + L_1$$

Стіна вище

Вертикальний
поперечний переріз

$$L_1 \cong \frac{h_{eq}}{3}$$

$$L_t = \sqrt{L_L^2 + \left(L_H - \frac{h_{eq}}{3} \right)^2} + L_1$$

Нема стіни вище
або $h_{eq} > 1,25 w_t$

Рис. 3. Розміри полум'я (природня вентиляція)

Довжина полум'я уздовж осі визначається по формулах:

— якщо $L_L > 0$:

$$L_t = L_L + \frac{h_{eq}}{2},$$

якщо є стіна над вікном

$$\text{або } h_{eq} \leq 1,25 w_t; \quad (15)$$

$$L_t = \sqrt{L_L^2 + \left(L_H - \frac{h_{eq}}{3} \right)^2} + \frac{h_{eq}}{2},$$

якщо немає стіни над вікном

$$\text{або } h_{eq} > 1,25w_i; \quad (16)$$

— якщо $L_L = 0$, то $L_1 = 0$.

Температура полум'я у вікні, визначається по формулі [7]:

$$T_w = 520 / (1 - 0,4725 \cdot (Lfw_t/Q)) + T_0, \text{ К.} \quad (17)$$

Формула (17) слухна при виконанні умови $Lfw_t/Q < 1$.

Ступінь чорності полум'я у вікні допускається приймати $\varepsilon_f = 1$.

Температура полум'я уздовж осі визначається по формулі [7]:

$$T_z = (T_w - T_0) (1 - 0,4725 \cdot (Lxwt/Q)) + T_0, \text{ К,} \quad (18)$$

де L_x — осьова відстань від вікна до крапки, для якої проводиться розрахунки.

Формула (18) слухна при виконанні умови $L_x w_t / Q < 1$.

Чорності полум'я (пожежі) допускається визначати по формулі [7]:

$$\varepsilon_f = 1 - e^{-0,3d_f}, \quad (19)$$

де d_f — товщина полум'я, м.

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією визначається по формулі [7]:

$$\alpha_c = 4,67 \cdot (1/deq)^{0,4} \cdot (Q/Av)^{0,6}. \quad (20)$$

Якщо на верхньому краї вікна по всій його ширині (рис. 4) розташований виступ (балкон, козирок і т.д.) з горизонтальною проекцією W_a , а також, якщо над вікном є стіна й $h_{eq} \leq 1,25$, висота й горизонтальна проекція полум'я повинні перераховуватися в такий спосіб:

— висота полум'я L_L , визначена відповідно до (3), зменшується на $W_a \cdot (1 + \sqrt{2})$;

— горизонтальна проекція полум'я L_H , визначена відповідно до (6), збільшується на W_a .

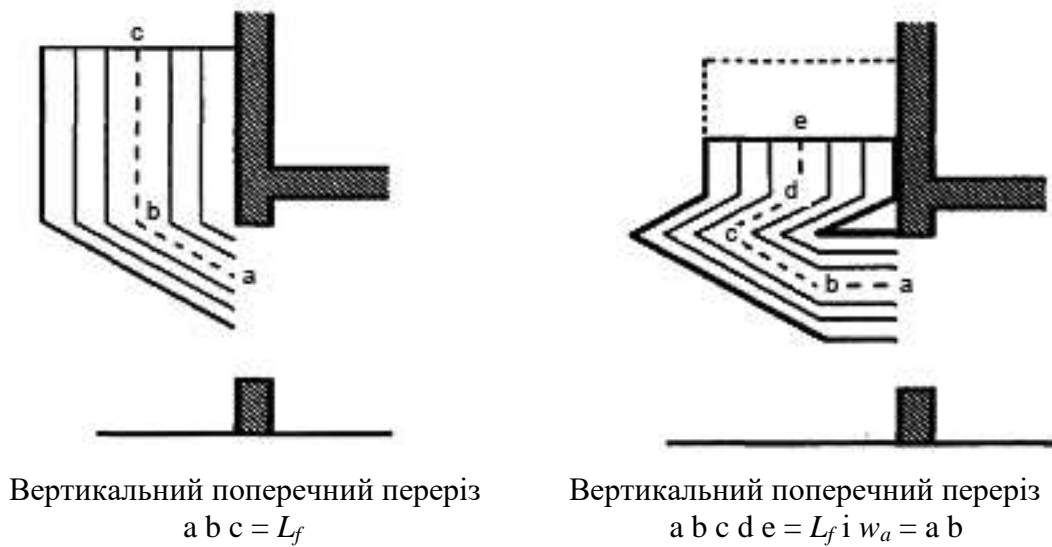


Рис. 4. Відхилення полум'я

Якщо на верхньому краї вікна по всій його ширині (рис. 4) розташований виступ (балкон, козирок і т.д.) з горизонтальною проекцією W_a , а також якщо над вікном немає стіни або $h_{eq} > 1,25w_t$, висота й горизонтальна проекція полум'я повинні перераховуватися в такий спосіб:

- висота полум'я L_L , визначена відповідно до (9), зменшується на W_a ;
- горизонтальна проекція полум'я L_H , визначена відповідно до (11), збільшується на W_a .

Важливу роль при проведенні розрахунків відіграє кутовий коефіцієнт опромінення, що визначається за формулою [7]:

$$dF_{d1-d2} = \frac{\cos \Theta_1 \cos \Theta_2}{\pi S_{1-2}^2} \cdot dA_2. \quad (21)$$

Кутовий коефіцієнт опромінення вказує частку загального теплового потоку від заданої випромінюючої поверхні, яка досягає заданої поверхні, що приймає. Його значення залежить від розміру випромінюючої поверхні, відстані між випромінюючою та приймаючою поверхнею і їх орієнтації по відношенню друг до друга (рис. 5).

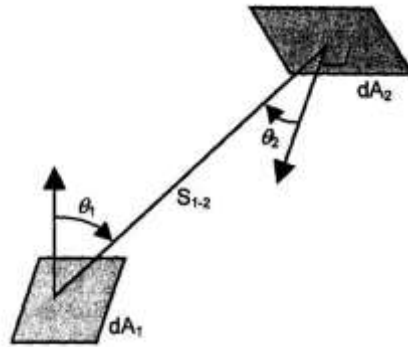


Рис. 5. Променистий теплообмін між двома поверхнями

Серед інших методів дослідження теплопередачі варто зазначити про польовий метод. Використання цього методу унеможливорює визначення температури в кожній точці простору, з огляду на нерівномірність розподілу температур унаслідок турбулентності газового потоку [8]. Недоліки усереднених моделей відсутні в польових моделях, у яких застосовують повну систему рівнянь Нав'є – Стокса [9] (рис. 6).



Рис. 6. Теоретична база для розв'язку задач теплообміну

Що стосується експериментальних методів дослідження теплопередачі, вони базуються на теплових випробуваннях з метою визначення теплоізоляційних властивостей будівельних конструкцій за певних температурно-вологісних умов по обидва боки конструкції в усталеному режимі фактичних значень:

- поверхневої густини теплового потоку крізь огорожувальну конструкцію (ОК) та температури внутрішньої і зовнішньої поверхонь ОК, характерних термічно однорідних ділянок ОК контактними засобами вимірювальної техніки;

- температури внутрішнього і зовнішнього повітря НС, що межує з поверхнями ОК, і обчислюванні опору теплопередачі або приведенного опору теплопередачі за отриманими даними згідно з розрахунковими формулами [10].

Особливості теоретичної бази, що застосовують у програмних продуктах обчислювальної газогідродинаміки ґрунтуються на застосуванні сучасного програмного забезпечення, зокрема моделювання теплових процесів у середовищі комп'ютерних систем «CFD», дає змогу зважати на всі необхідні параметри розрахунків без наведення коефіцієнтів, досліджувати вплив геометричних і конструктивних характеристик, наприклад для випробувань залізобетонних конструкцій та проведенні чисельного експерименту. Основні програмні продукти «CFD» подано у вигляді схеми (рис.7).

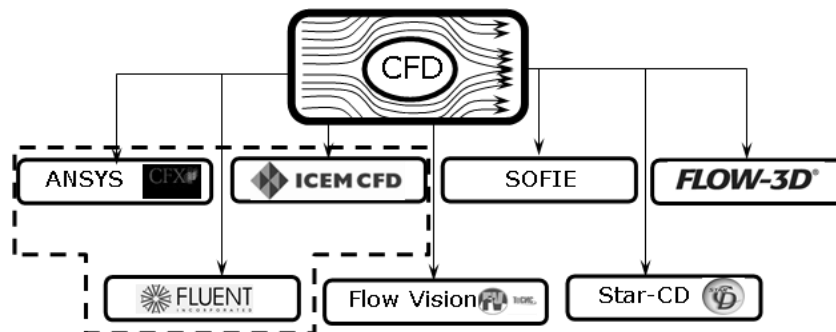


Рис. 7. Сімейство програмних продуктів «CFD», поширених в Україні

Вибір конкретного програмного комплексу залежить від особливостей модельованих процесів, можливостей обчислювальної техніки та користувача.

Висновки.

1. Наведено основні відомості щодо процесів теплопередачі на прикладі будівельної конструкції у вигляді схеми.
2. Проведений аналіз існуючих методів досліджень теплових впливів дозволив виділити два основні: теоретичні та експериментальний

методи. Останній базується на проведенні повноцінних випробувань, що не завжди являється можливим та має низьку економічну доцільність. Теоретичні методи більш складні. Серед яких виділено два основних: метод за ДСТУ-Н EN 1991-1-2:2010 та польовий метод. Проведений детальний розбір методу зазначеного в Єврокодї 1 як єдиного стандартизованого в Україні, в результаті чого встановлено, метод розрахунків теплових впливів дозволяє враховувати ряд факторів починаючи від можливості врахування прорізів у стїнах і закінчуючи кутовим коефіцієнтом опромїнювання. Однак, даний метод встановлює загальні підходи до проведення розрахунків. У зв'язку з цим виникає необхідність розроблення більш конкретизованого методу для обґрунтування протипожежних відстаней між будинками, який лїг би в основу розроблення національного стандарту щодо розрахункового визначення протипожежних відстаней між будинками.

3. На основі аналізу програмних комплексів для моделювання теплових процесів виділено найбільш розповсюджені.

Лїтература

1. Шкловер А.М. Основы строительной теплотехники жилых и общественных зданий /А.М. Шкловер, Б.Ф. Васильев, Ф.В. Ушков. – М.: Стройиздат, 1956. – 350 с.
2. Табунщиков Ю.А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.
3. А.Н. Нагорная. Математическое моделирование и исследование нестационарного теплового режима зданий: диссертация ... кандидата технических наук : 05.13.18 / Нагорная Анастасия Николаевна; [Место защиты: Юж.-Ур. гос. ун-т].- Челябинск, 2008.- 150 с.: ил. РГБ ОД, 61 09-5/398.

4. Пожарная профилактика в строительстве / [Грушевский Б.В., Яковлев А.И., Кривошеев И.А. и др.] под ред. В.Ф. Кураленки-на.- М.: ВИПТШ, 1985. – 451 с.
5. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле / [Ройтман М.Я., Комиссаров Е.П., Пчелинцев В.А.] под ред. Ю.А. Кошмарова.- М.: ВИПТШ, 1977. – 415 с.
6. Пожарная профілактика в строительстве / [Романенко П.Н., Кошмаров Ю.А., Башкирцев М.П.] под ред. Ф.А. Аммосова.- М.: Стройиздат, 1978. – 363 с.
7. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (EN 1991-1-2:2002, IDT) ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010, [Чинний від 01.07.2013] Мінрегіонбуду України від 27.12.2010 р. № 549 – 74 с. (Національний стандарт України).
8. Хасанов И. Р. Развитие методов исследования огнестойкости и пожарной опасности строительных конструкций и инженерного оборудования / И. Р. Хасанов, В. И. Голованов // Юбилейный сборник трудов ФГУ ВНИИПО МЧС России / под общей редакцией Н. П. Копылова. – М. : ВНИИПО, 2007. – С. 121–158.
9. Метрологічні особливості вогневих випробувань залізобетонних будівельних конструкцій на вогнестійкість / С. В. Поздєєв, О. М. Тищенко, О. М. Нуянзін [та ін.] // Пожежна безпека: теорія і практика: зб. наук. праць. – Черкаси : АПБ, 2011. – № 8. – С. 73–79.
10. Метод визначення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій. ДСТУ Б В.2.6-101:2010 [Чинний від 2010-10-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 90 с. – (Національний стандарт України).