

*Е.М. Гуліда, д-р техн. наук, професор, А.А. Ренкас,  
О.В. Меньшикова, канд. фіз.-мат. наук, доцент  
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності),*

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННОГО ПЕРЕКРИТТЯ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ В ПРОЦЕСІ ПОЖЕЖІ

Досліджено та уточнено методи забезпечення вогнестійкості житлових будівель з урахуванням температурної дії пожежі на основі її теоретичного моделювання в закритих приміщеннях. Доцільно заздалегідь визначати вплив всіх чинників будівельних елементів на розвиток пожежі з використанням математичних моделей пожежі та врахуванням отриманих даних для розроблення нормативів, які сприятимуть підвищенню вогнестійкості, міцності та надійності елементів конструкції будівлі, визначенню критичного часу тривалості пожежі та пришвидшенню її ліквідації. Отримана інтегральна модель пожежі дозволяє визначати температуру в конвективній колонці та враховувати її вплив на конструкції перекриття. При внесенні уточнень до методів забезпечення стійкості будівель було визначено, що в умовах реальної пожежі умова міцності залізобетонної плити не забезпечується. Внесено пропозиції щодо забезпечення стійкості перекриття.

*Ключові слова:* пожежа, площа пожежі, температура, температурні поля, вогнестійкість, стійкість будівель.

**Постановка проблеми.** Різноманітні будівельні елементи кожної споруди характеризуються цілим рядом чинників, які значною мірою відрізняються один від одного та у випадку пожежі по-різному впливають на її розвиток. Розрахунок вогнестійкості житлових будівель проводиться на основі стандартної температурної кривої пожежі. В Україні рекомендацій з визначення межі вогнестійкості розрахунковими методами не існує. Для визначення цього параметра використовувались Методичні рекомендації з визначення межі вогнестійкості залізобетонних конструкцій. Необхідно розробити математичну модель розрахунку тепломасообміну під час пожежі в приміщенні. На основі отриманої моделі можна визначати температурні поля в приміщенні та у будівельних конструкціях. Це дасть змогу розрахувати час, через який елементи будівлі втратять свою несучу здатність.

**Мета роботи.** На підставі результатів теоретичних досліджень визначити температурні поля в приміщенні під час пожежі та їх вплив на будівельні конструкції.

Рівняння матеріального балансу пожежі можна представити як рівняння балансу для газового середовища в приміщенні [1, 2]:

$$\frac{Vd\rho_c}{d\tau} = \psi + \sum_i G_i - \sum_k G_k, \quad (1)$$

де  $\rho_c$  – середньооб'ємна густина газового середовища в приміщенні, кг/м<sup>3</sup>;

$V$  – вільний об'єм приміщення, м<sup>3</sup>;

$\tau$  – час, с;

$\psi$  – швидкість вигорання (швидкість газифікації) горючого матеріалу в розглянутий момент часу, кг/с;

$\sum_i G_i$  – витрати повітря, яке подається з навколишнього середовища в приміщення в розглянутий момент часу процесу розвитку пожежі, кг/с;

$\sum_k G_k$  – витрати газів, які покидають приміщення через прорізи в розглянутий момент часу, кг/с.

В більшості випадків в приміщеннях відсутні прорізи для надходження свіжого повітря із зовні, тобто на початковій стадії пожежі повітря не надходить в приміщення, а відбувається тільки виштовхування газів із приміщення через щілини та малі прорізи. Ця особли-

вість на початковій стадії пожежі дає змогу спростити диференціальне рівняння пожежі. Тільки через деякий час середня температура в середовищі приміщення досягне 300...350 °С, що призведе до руйнування шибок і процес газообміну стане двостороннім. Тому на початковій стадії пожежі можна відкинути член, який враховує витрати повітря, що подаються з навколишнього середовища в приміщення, тобто

$$\sum_i G_i = 0. \quad (2)$$

Крім цього, приміщення, в якому виникла пожежа, не є абсолютно герметичним і середній тиск  $p_c$  всередині його залишається практично сталим і дорівнює тиску зовнішнього повітря. Тоді з достатньою точністю можна прийняти

$$\frac{dp_c}{d\tau} \approx 0; \quad \rho_c T_c = \rho_0 T_0, \quad (3)$$

де  $\rho_c, T_c$  – середнє значення густини і температури середовища приміщення на початковій стадії пожежі відповідно;  $\rho_0,$

$T_0$  – густина і температура середовища приміщення перед початком пожежі.

Інтервал часу, протягом якого виконується односторонній газообмін, дорівнює приблизно 10...15 хв. Тому можна прийняти, що коефіцієнт повноти згоряння  $\eta$  та об'єм приміщення  $V$  залишаються незмінними. Крім цього, треба врахувати частину теплового потоку, який переходить у стінку, стелю, підлогу

$$Q_{oc} = \varphi Q_{\Pi} = \varphi \eta \psi Q_{\min}, \quad (4)$$

де  $Q_{oc}$  – сумарний тепловий потік, який переходить у стіни, стелю, підлогу, Вт;

$\varphi$  – коефіцієнт теплопоглинання [1];

$Q_{\Pi}$  – швидкість тепловиділення в полум'яній зоні осередку пожежі, Вт;

$Q_{\min}$  – найнижча теплота згоряння, Дж/кг.

В цьому випадку диференціальне рівняння пожежі з урахуванням припущення, що ізобарна теплоємність  $c_p$  буде дорівнювати ізобарній теплоємності  $c_{p0}$  перед початком пожежі ( $c_p = c_{p0} = \text{const}$ ) можна представити у вигляді

$$\frac{d(\rho_c V)}{d\tau} = \psi - \sum_k G_k. \quad (5)$$

Рівняння енергії внаслідок виникнення пожежі буде

$$\psi Q_{\min} \eta - c_p T_c \sum_k G_k - Q_{oc} = 0. \quad (6)$$

На підставі залежності (6) та з урахуванням залежностей (3) і (4), отримуємо

$$\sum_k G_k = \frac{\psi Q_{\min} \eta (1 - \varphi)}{c_p \rho_0 T_0} \rho_c. \quad (7)$$

З урахуванням залежності (7), диференціальне рівняння пожежі (5) має вид

$$\frac{V d\rho_c}{d\tau} = \psi - \frac{\psi Q_{\min} \eta (1 - \varphi)}{c_p \rho_0 T_0} \rho_c = \psi \left[ 1 - \frac{Q_{\min} \eta (1 - \varphi)}{c_p \rho_0 T_0} \rho_c \right]. \quad (8)$$

Для інтегрування диференціального рівняння (8) необхідно розділити змінні та врахувати початкові умови, а саме: при  $\tau = 0$  значення  $\rho_c = \rho_0$ . Після інтегрування та підстановки замість  $\psi$  добутку  $\psi_n \cdot S_{\Pi}$ , тобто добутку питомої швидкості вигорання  $\psi_n$  (кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>) на площу пожежі  $S_{\Pi}$  (м<sup>2</sup>), отримуємо

$$\rho_c = \left( \rho_0 - \frac{c_p \rho_0 T_0}{Q_{\min} \eta (1 - \varphi)} \right) \exp \left[ - \frac{\psi_n S_{\Pi} Q_{\min} \eta (1 - \varphi)}{c_p \rho_0 T_0 V} \tau \right] + \frac{c_p \rho_0 T_0}{Q_{\min} \eta (1 - \varphi)}. \quad (9)$$

Для переходу від середнього значення густини газової суміші приміщення  $\rho_c$  до температури необхідно використовувати наступну залежність:

$$T_c = T_0 \frac{\rho_0}{\rho_c}. \quad (10)$$

Температуру газової суміші в конвективній колонці можна визначити за допомогою залежностей (9-10). Розрахуємо температуру в приміщенні розміром 6,33x3,9x2,57м. Площа пожежі 3 м<sup>2</sup>.

Крім цього, при розрахунках за залежністю (9) необхідно враховувати для пожеж в закритих приміщеннях коефіцієнт повноти згорання  $\eta$ , який залежить від температури в середовищі закритого приміщення [2] (це пов'язано зі зменшенням кисню в об'ємі приміщення), а також зміну питомої густини повітря (при  $T_0 = 293 \text{ K} \rightarrow \rho_0 = 1,217 \text{ кг/м}^3$ ).

На основі розрахунків отримуємо такі температурні поля в досліджуваному приміщенні (рис.1).

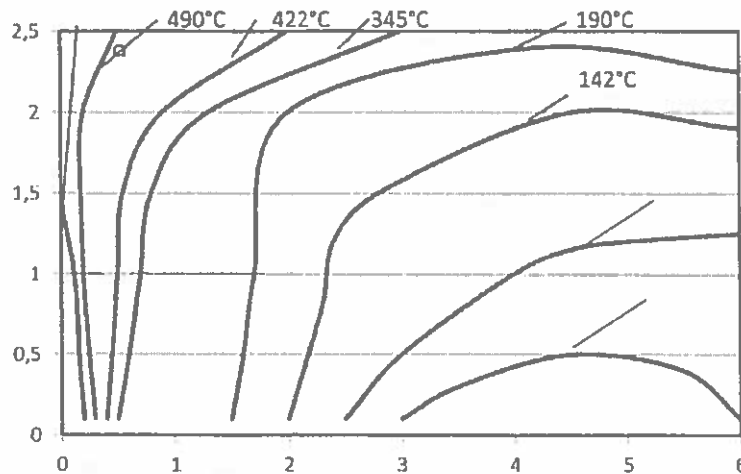


Рис. 1. Температурні поля в досліджуваному приміщенні на 20 хв

Пожежа може виникати в правому куті приміщення, в лівому краю приміщення та по середині приміщення. Обираємо найгірший варіант, коли пожежа розвинулася в центрі досліджуваного приміщення.

Для забезпечення стійкості житлових будівель необхідно враховувати температурні поля під час пожежі. Маючи такі дані, можна визначити температурні поля в самих будівельних конструкціях.

Дослідимо температурні поля в стандартній залізобетонній плиті розміром 1,2x6x0,24м з межею вогнестійкості REI 140 [7-8]. Товщина захисного шару бетону до краю арматури  $\delta=0,02 \text{ м}$ , діаметр пустот  $d_n=0,16\text{м}$ . Бетон важкий на гранітному заповненні класу B15,  $R_{bu}=13,25\text{МПа}$ . Арматура розтягнута класу Ат-V [ $R_{sn}=785\text{МПа}$ ;  $R_{su}=785/0,9=872\text{МПа}$ ], 7 стержнів діаметром 12 мм, площа поперечного перерізу  $A_s=5,04 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ .

Для початку слід визначити максимальні напруження, які діють на залізобетонну плиту перекриття. Визначимо навантаження, яке сприймає перекриття, та побудуємо епюру моментів (рис.2) [6].

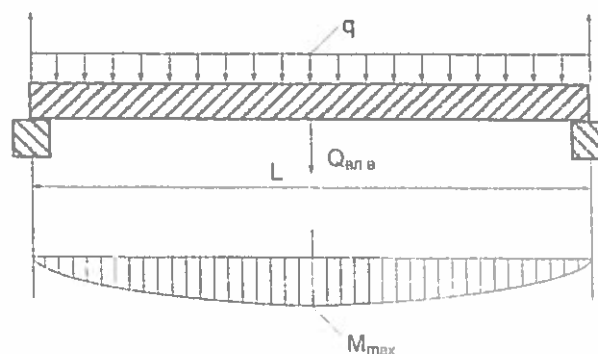


Рис. 2. Епюра моментів залізобетонної плити перекриття

Визначасмо розподілене навантаження на балку  $q_{p.n.}$ :

$$q_{p.n.} = q \cdot b \cdot g = 150 \cdot 1,2 \cdot 9,8 = 4200 \text{ Н/м}, \quad (11)$$

де  $q$  – пожежне навантаження, кг/м<sup>2</sup>;  
 $b$  – площа плити перекриття, м<sup>2</sup>;  
 $g$  – прискорення вільного падіння, м<sup>2</sup>/с.

Визначаємо розподілене навантаження на балку від маси плити  $q_{nл.}$ :

$$q_{nл.} = \frac{m_{nл.} \cdot g}{b} = \frac{300 \cdot 9,8}{1,2} = 2500 \text{ Н/м}, \quad (12)$$

де  $m_{nл.}$  – маса плити, кг.

Визначасмо максимальний момент [6]:

$$M_{\max} = \frac{(q_{p.n.} + q_{nл.}) \cdot L^2}{8} = \frac{(4200 + 2500) \cdot 6^2}{8} = 30150 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (13)$$

де  $L$  – довжина плити, м.

Визначаємо висоту стисненої зони бетону  $x$  з рівняння суми проєкцій внутрішніх зусиль на повздовжню вісь перерізу плити [5]:

$$R_s A_s - R_b b x = 0, \quad (14)$$

де  $R_s$  – внутрішнє зусилля в розтягнутій арматурі, МПа;

$A_s$  – площа поперечного перерізу арматури, м<sup>2</sup>;

$R_b$  – внутрішнє зусилля в бетоні стиснутої зони, МПа.

Розв'язавши рівняння (14), отримаємо величину стиснутої зони бетону  $x=0,0277\text{м}$ .

Виходячи з суми згинальних моментів всіх зусиль відносно осі, яка проходить через центр ваги стиснутої зони бетону, умова міцності набуває вигляду (15) [5]:

$$M_{\max} = 30150 \text{ Н} \cdot \text{м} \leq R_s A_s (h_0 - 0,5x) = 88000 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (15)$$

де  $h_0$  – робочу висоту перерізу плити, м.

Стіни приміщення, які нагріваються з однієї сторони в умовах пожежі до тих пір, поки не збільшиться температура протилежної поверхні, являють собою напівобмежені тіла. В практиці прогрів стін, які нагріваються з однієї сторони, розраховується за рівнянням теплопровідності напівобмеженого тіла і в тому випадку, коли температура протилежної стінки вже збільшується. Але такий розрахунок обмежується такою умовою[3]:

$$\frac{\delta}{2\sqrt{\alpha_t \tau}} \geq 0,6, \quad (16)$$

де  $\delta$  – товщина шару бетону, для якої шукаємо значення температури, м;

$\alpha_t$  – коефіцієнт прогріву бетону, м<sup>2</sup>/год;

$\tau$  – час прогріву, год.

Отже, температуру в будь-якій точці стінки під час пожежі можна визначати за допомогою рівняння нестационарної теплопровідності напівобмеженого тіла. Визначити температуру  $t_{x,\tau}$  в будь-якій точці  $x$ , в будь-який момент часу  $\tau$  можна за таким рівнянням[3]:

$$t_{x,\tau} = t_w - (t_w - t_0) \operatorname{erf} \left[ \frac{\delta}{2\sqrt{\alpha_t \tau}} \right], \quad (17)$$

де  $\operatorname{erf} \left[ \frac{\delta}{2\sqrt{\alpha_t \tau}} \right]$  – математична функція Крампа або інтеграл похибок Гауса;

$t_w$  – температура на поверхні стінки, що нагрівається;

$t_0$  – температура на стінці в початковий момент часу.

Згідно із залежністю (12) визначаємо температурні поля в перерізі залізобетонної конструкції. Маючи такі дані необхідно визначити температуру на арматурі залізобетонної конструкції. Провівши розрахунки отримуємо такі температурні поля в плитах перекриття (рис.4).

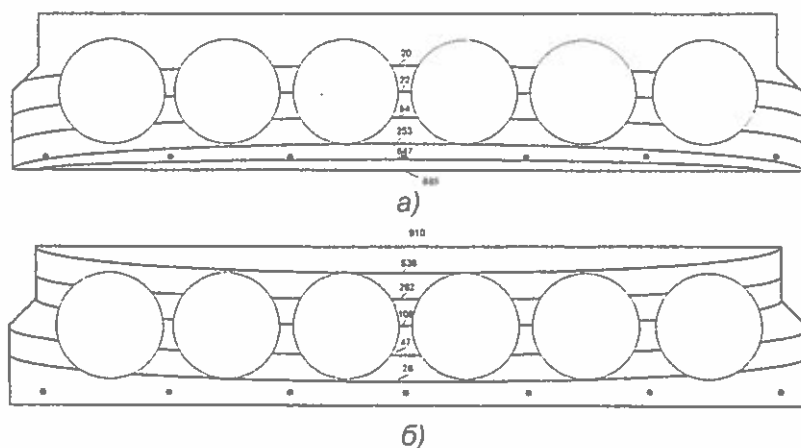


Рис.3. Температурні поля в залізобетонній плиті на 60-ій хвилині пожежі:  
а) над осередком пожежі; б) під осередком пожежі

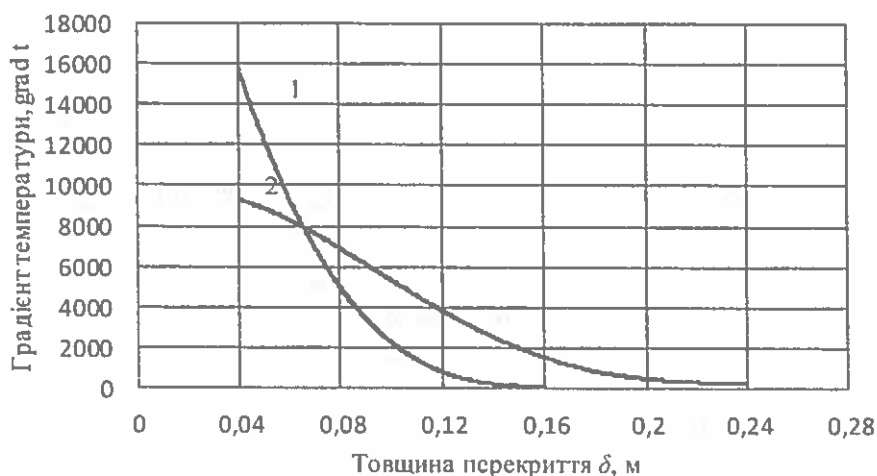


Рис.4. Градієнт температури в залізобетонній плиті на 60-ій хвилині пожежі:  
1) над осередком пожежі; 2) під осередком пожежі

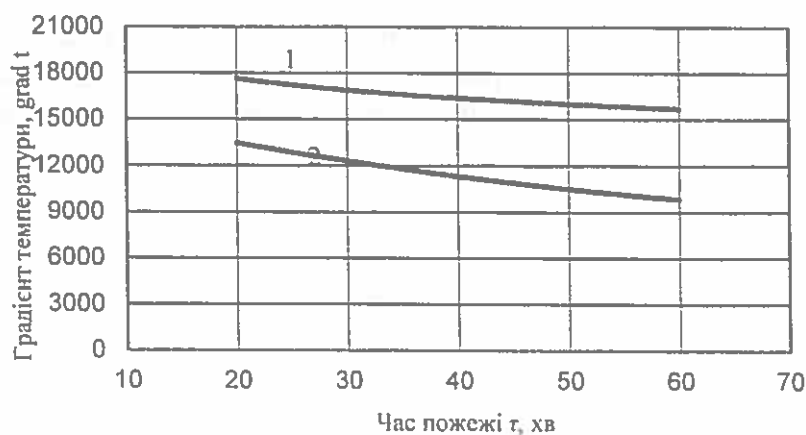
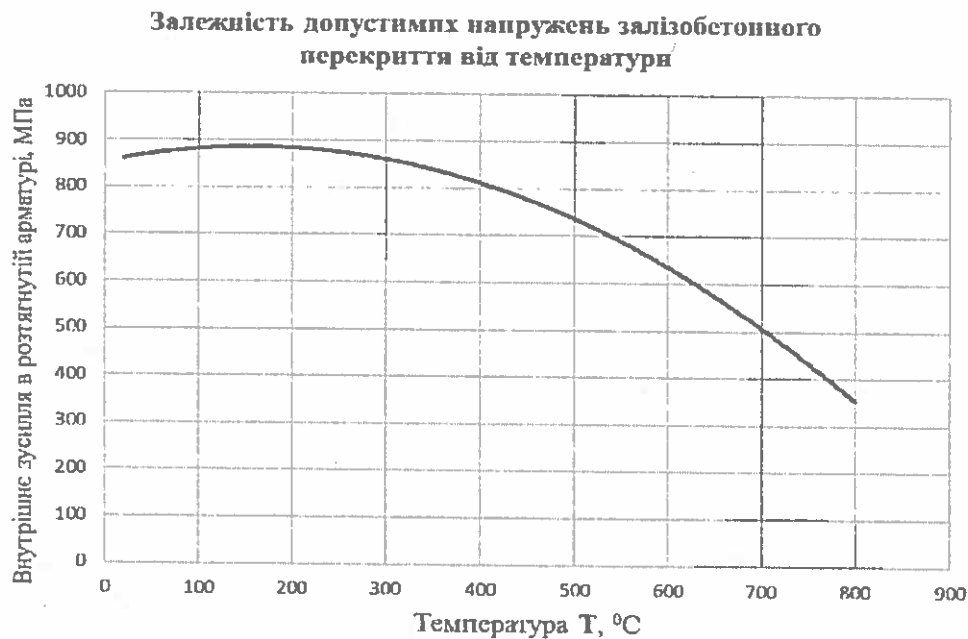


Рис. 5. Градієнт температури в поверхневому шарі залізобетонної плити залежно від часу  
1) під осередком пожежі; 2) над осередком пожежі

Гradient температури різко спадає в перекритті, яке знаходиться над осередком пожежі, тоді як в перекритті, що знаходиться під осередком пожежі він зменшується повільніше (рис.4). Залежно від часу gradient змінюється повільно в меншу сторону.

Визначаємо температуру на арматурі за годину часу.

$$t_{0,02}(\tau = 60 \text{ хв}) = 885 - (885 - 20) \operatorname{erf} \left[ \frac{0,02}{2\sqrt{0,00133 \cdot 1}} \right] = 647^\circ \text{C}$$



*Рис. 5. Залежність допустимих напружень залізобетонної плити перекриття від температури*

На підставі рекомендацій [4] (рис. 5) внутрішні зусилля в розтягнутій арматурі на 60 хв будуть  $R_s = 350$  МПа, тобто міцність залізобетонної плити перекриття забезпечується, але знаходиться на критичній межі.

$$M_{\max} = 30150 \text{ Н} \cdot \text{м} \leq R_s A_s (h_0 - 0,5x) = 35000 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

З подальшим збільшенням температури значення  $R_s$  зменшується, що перешкоджає забезпеченню межі вогнестійкості REI 140 цієї плити перекриття. Одним із напрямків забезпечення вогнестійкості залізобетонної плити перекриття є збільшення захисного шару бетону з 0,02 м до 0,03 м.

#### **Висновки**

1. Розроблено інтегральну математичну модель тепломасообміну під час пожежі в закритих приміщеннях, розв'язок якої дав змогу отримати залежність для визначення температури в зоні конвективної колонки.

2. Результати дослідження показують, що межа вогнестійкості стандартної залізобетонної плити при пожежі в закритому приміщенні не забезпечується, тому для забезпечення стійкості перекриття будинків необхідно враховувати температурний режим реальної пожежі.

3. Необхідно розробити нормативну базу для забезпечення стійкості перекриття будівель різного призначення з урахуванням температурного режиму реальної пожежі.

#### **Список літератури:**

- ГОСТ 12.1.004 – 91. Пожарная безопасность. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 31 с.
- Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.

3. Основы пожарной теплофизики: Учебник для пожарно-техн. училищ / М.П. Башкирцев, Н.Ф. Бубырь, Н.А. Минаев, Д.Н. Ончуков. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1984. – 200с., ил.

4. Белов В.В., Семенов К.В., Ренев И.А. Огнестойкость железобетонных конструкций, модели и методы расчета. – Magazine of civil engineering.

5. Стасюк М.І. Залізобетонні конструкції Ч.1. Основи розрахунку залізобетонних конструкцій за граничними станами: Навч. посібник. – К.: ІЗМН, 1997. – 272 с.

6. Гуліда Е.М., Дзюба Л.Ф., Ольховий І.М. Прикладна механіка: Підручник / За ред. Е.М. Гуліди. – Львів: Світ, 2007. – 384 с. з іл.

7. Методические рекомендации по расчету огнестойкости и огнестойкости железобетонных конструкций. – Москва: ГУП «НИИЖБ», 2000. – 92с.

8. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001 г. – 382 с.: ил УДК614.841,34:699,81.

*Гуліда Е.М., Ренкас А.А.*

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОГНЕСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ПЕРЕКРЫТИЯ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ В ПРОЦЕССЕ ПОЖАРА

Исследовано и уточнено методы обеспечения огнестойкости перекрытия жилых зданий с учетом температурного воздействия пожара на основании его теоретического моделирования в закрытых помещениях. Необходимо наперед определить влияние всех факторов строительных элементов на развитие пожара с использованием математических моделей пожара и учетом полученных данных для разработки нормативов, способствующие повышению огнестойкости, прочности и надежности элементов конструкции здания, определению критического времени продолжительности пожара и ускорению ее ликвидации. Полученная интегральная модель пожара позволяет определять температуру в конвективной колонке и учитывать ее воздействие на конструкции перекрытия. При внесении уточнений к методам обеспечения устойчивости зданий было определено, что в условиях реального пожара условие прочности железобетонной плиты не обеспечивается. Внесены предложения по обеспечению устойчивости перекрытия.

*Ключевые слова:* пожар, площадь пожара, температура, температурные поля, огнестойкость, устойчивость зданий.

*Gulida E.M., Renkas A.A.*

### SOFTWARE FIRE REINFORCED CONCRETE FLOORS OF RESIDENTIAL BUILDINGS IN THE FIRE

Techniques to ensure stability of the overlap of residential buildings to the effects of temperature on the basis of theoretical modelling of fire in enclosed spaces are studied and specified. It is necessary to determine in advance the effect of all factors of building elements on the development of a fire using mathematical models of fire and use the elaborated data to develop standards that improve fire resistance, durability and reliability of building components, in order to determine the critical duration of the fire and to accelerate its elimination. The resulting integrated model allows determining temperature in the convection column, and considering its impact on overlap structures. When making adjustments to the methods of ensuring the sustainability of buildings, it was determined that in real fire strength of reinforced concrete slab is not provided. Suggestions to ensure the sustainability of overlap were made.

*Key words:* fire, fire area, temperature, temperature fields, fire resistance, resistance of buildings.

