

## БУДІВНИЦТВО

УДК 69.036.3

Л. В. Гапонова<sup>1</sup>  
П. А. Резник<sup>1</sup>

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ ПЛИТИ НОВОГО ТИПУ

<sup>1</sup>Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

Проведено дослідження напружено-деформованного стану нового типу архітектурно-будівельної системи «Монофант» унаслідок одночасного впливу вертикальних навантажень та нагрівання за стандартним режимом пожежі. Отримано поля температур за висотою перетину для всіх меж вогнетривкості. Запропонований алгоритм урахує трансформації розрахункової схеми залежно від величин температур і надлишкового тиску в порожнинах розташування утеплювача.

**Ключові слова:** пожежа, температура, архітектурно-будівельна система «Монофант».

#### Вступ

У процесі розвитку сучасного будівництва із застосуванням монолітного та збірного залізобетону постійно підвищуються вимоги до конструкцій що зводяться, а саме: створення нових архітектурних форм для облаштування різноманітних житлово-цивільних об'єктів, полегшення застосовуваних конструкцій і вдосконалення традиційних технологій бетонування шляхом застосування нових матеріалів. Однією з систем, які відповідають сучасним вимогам щодо залізобетонних конструкцій, є архітектурно-будівельна система «Монофант» [1] (рис. 1).

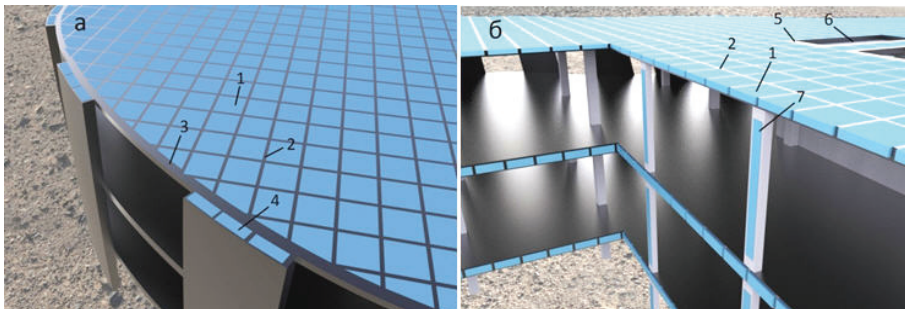


Рис. 1. Конструкція елементів каркаса системи «Монофант»: а — конструкція перекриття; б — конструкція перекриття з отворами; 1 — вкладка-пустотоутворювач; 2 — внутрішні ребра жорсткості перекриття; 3 — зовнішнє окантування перекриття ребром жорсткості; 4 — вкладка-пустотоутворювач у зовнішніх елементах жорсткості; 5 — внутрішнє окантування ребром жорсткості; 6 — отвори в перекритті; 7 — вкладка-пустотоутворювач у колоні



Рис. 2. Процес бетонування плити архітектурно-будівельної системи «Монофант»

Однією з головних особливостей цієї системи є те, що недобувані вкладки-пустотоутворювачі використовують для зменшення ваги не тільки залізобетонних перекриттів, але й усіх базових елементів каркасного будинку, що спричинило затребуваність цієї системи під час будівництва нових або реконструкції наявних будівель (рис. 2).

Незважаючи на всі переваги, особливості роботи всієї системи і окремих конструкцій, у разі впливу високих температур унаслідок надзвичайної ситуації пожежі залишаються недостатньо дослідженими. У цій роботі розглянуто тільки плиту системи «Монофант», що піддавалася впливу високих температур.

Конструкція плити ризниться простою зовнішньою і складною внутрішньою геометрією. Головною особливістю такої конструкції є приховування в тілі плити вкладок обумовленої форми і розмірів, виконаних із легких, часто використовуваних в будівництві матеріалів таких як пінополістирол, мінеральна вата і т. д. (рис. 3).

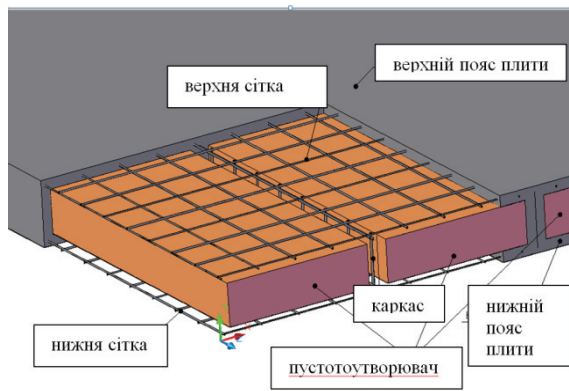


Рис. 3. Конструктивні особливості плити системи «Монофант»

Ефективність цієї конструкції зумовлюється також симетрією перетинів, яка забезпечує можливість її довільного обпирання, що спричиняє знакозміненість поля згинальних моментів.

Зазначене є наслідком відмінності опорів бетону розтягування і стиснення, з одного боку, і максимальної ефективності (у сенсі витрати матеріалів) одnobічно оребрених систем — з іншого. Отже, конструкція розглянутих оболонок складається з двох (верхньої і нижньої) обшивок, внутрішніх ребер і вкладок-пустотоутворювачів.

Проблеми вогнестійкості залізобетонних каркасних конструкцій вивчали багато дослідників. Приміром, у роботах [2—4] наведено результати широких випробувань залізобетонних каркасних кон-

струкцій. Розглядалися як окремі конструктивні елементи, так і каркаси, виконані в натуральну величину. Проблемами моделювання каркасних залізобетонних споруд висвітлені у роботах [5—6]. У цих роботах, як і в переважній більшості сучасних робіт щодо моделювання впливу високих температур унаслідок надзвичайного впливу пожежі, використовувалися програмні комплекси, що ґрунтуються на застосуванні методу скінченних елементів (далі МСЕ). Особливості матеріалів під час впливу на них високих температур висвітлено в роботах [7—10].

Фізико-хімічні процеси під час високотемпературного нагрівання пінополістиролу описано в роботі [11]. У ній наочно показано, що пінополістирол (далі ППС) є термопластичним матеріалом. Початок розкладання ППС визначається температурою 265 °С, що відповідає втраті 8 % маси внаслідок видалення вологи і летючих продуктів. Температура максимальної швидкості деструкції 320 °С відповідає 40 % втрати маси. Цьому процесу передують склування за температури 180 °С і окислення, що розпочинається за температури 230 °С і закінчується за температури 390 °С (72 % втрати маси). Максимуму окислювальних процесів досягають за температур 300...350 °С. Ця робота доводить, що необхідно брати до уваги вплив температури на вкладки-пустотоутворювачі, які виконані з ППС.

Незначна кількість досліджень поведінки залізобетонних конструкцій зі складною внутрішньою геометрією під час впливу високих температур з урахуванням матеріалу пустотоутворювачів приводить до необхідності проведення як натурних, так і чисельних досліджень.

*Метою досліджень є не тільки визначення реальних меж температур у перетинах конструкцій протягом встановлених нормативними документами проміжків часу, але й вивчення трансформації розрахункових схем (геометричної нелінійності) унаслідок дії високих температур, а також розроблення загального підходу щодо врахування цих факторів.*

*Об'єктом дослідження обрано плиту архітектурно-будівельної системи «Монофант».*

### Головна частина дослідження. Пропонований алгоритм

Оскільки внутрішня конструктивно-анізотропна структура елементів плити сформована з різних матеріалів, у ній спостерігаються місця збільшених неоднорідних теплових потоків. Зазначена неоднорідність гіпотетично може стати причиною взаємовпливу температури й деформації і навпаки. З огляду на це доцільно оцінювати цю взаємодію за допомогою динамічної теорії термопружності [10, 11].

Ця теорія базується на припущеннях В. Новацького про те, що деформація твердого тіла тісно пов'язана зі зміною його теплової енергії, отже, зі змінюванням розподілу температури в захисній конструкції. Змінюване в часі поле температур спричиняє зміну поля деформацій, і навпаки. Внутрішня енергія конструкції, таким чином, зумовлюється деформаціями і температурами.

Варто зазначити, що вплив поля деформацій на розподіл температур в твердих тілах незначний,

крім випадків різкої (стрибокподібної) зміни температур [10, 11]. Проте з огляду на неоднорідну внутрішню структуру формованої конструкції і невивченість процесів, які можуть виникнути в сталих і, особливо, аномальних умовах, вважається закономірною початкова відмова від традиційних гіпотез і припущень, які обґрунтовують поділ рівнянь Фойгта—Джеффріса і Ляме.

У зв'язку з цим, спочатку розглядається модель, що визначається системою лінійних рівнянь, записаних у векторній формі [11] за заданих крайових (граничних) і початкових умов.

$$\left. \begin{aligned} \mu \nabla^2 u + (\lambda + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} U + X &= \gamma \operatorname{grad} T + \rho \ddot{U}; \\ \nabla^2 T - (1/x) \dot{T} - \eta \operatorname{div} \dot{U} &= -Q/x, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де  $U$  — вектор переміщення;  $T$  — температура;  $\mu$ ,  $\gamma$  — постійні Ляме, що відповідають ізотермічному стану;  $\gamma = (3\lambda + 2\mu)\alpha_t$ ;  $\rho$  — інерційний коефіцієнт (узагальнена маса);  $X = \lambda_0/C_\varepsilon$ ;  $\eta = \frac{\gamma T_0}{\lambda_0}$ ;  $Q = W/\lambda_0$ ;  $\alpha_t$  — коефіцієнт лінійного термічного розширення;  $W$  — кількість тепла, виробленого в одиниці об'єму тіла за одиницю часу;  $\lambda_0$  — коефіцієнт теплопровідності;  $T_0$  — температура тіла в недеформованому й ненапруженому стані (зовнішні сили відсутні);  $C_\varepsilon$  — питома теплоємність за постійної деформації.

До моделі(1), що задається, додамо низку передумов і припущень:

1. Вважається наближено можливим ототожнення залежності «інтенсивність напружень—інтенсивність деформацій» із залежністю «напруження—деформація», отриманої шляхом експериментального випробування стандартного зразка при одноосьовому завантаженні (аналог другої гіпотези теорії малих пружно-пластичних деформацій);
2. Вважаються відомими (здебільшого, з експериментів) залежності фізико-механічних характеристик матеріалу конструкцій від температур [13];
3. Величини міцності й деформаційних параметрів вкладок-пустотоутворювачів вважаються величинами другого порядку нескінченно малих величин стосовно аналогічних параметрів базового матеріалу (залізобетону);
4. Конструкція в процесі нагрівання (охолодження) перебуває у низці станів, що характеризуються зміною температури оболонки; тиску й обсягу матеріалу у внутрішній порожнині;
5. Матеріал вкладки-пустотоутворювача, зі свого боку, при нагріванні може переходити з твердого стану в рідкий (точка плавлення) і з рідкого в газоподібний [13];
6. Коливання температур, що виникають в порожнині оболонки (за рахунок конвективного процесу), і тисків вважаються гармонічними, тобто  $T = T_1 \sin \omega t$ , де  $T_1$  — амплітуда температури,  $\omega$  — частота);
7. Вважається, що тиск в порожнинах змінюється в часі відповідно до виразу  $P = P_1 \cdot e^{-\beta(t)t}$ , де  $P_1$  — максимальний тиск,  $\beta = \beta(t)$  — відома функція (константа), різновид якої потрібно встановити шляхом розгляду процесу тріщиноутворення об'єми й фізико-механічних флуктуацій утеплювача);

Зазначені флуктуації в матеріалі вкладки, зумовлюють необхідність уведення в розгляд низки послідовних розрахункових схем, що відображають цю специфіку (рис. 4).

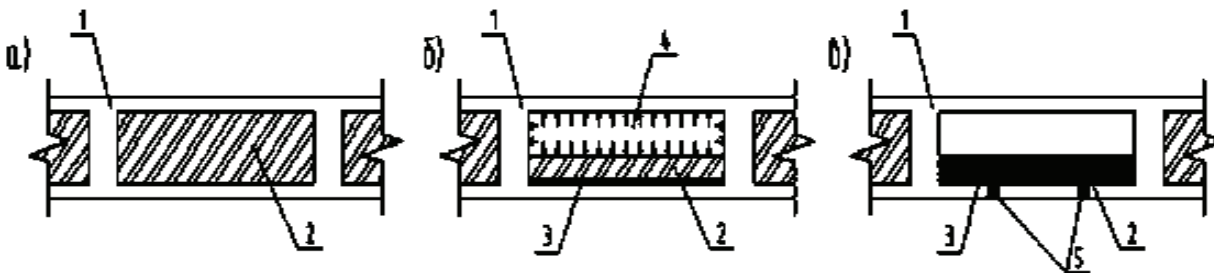


Рис. 4. Розрахункові схеми, що враховують флуктуації вкладиша-пустотоутворювача: а — для  $T \leq T^*$  ( $T^*$  — температура плавлення); б — для температур  $T > T^*$  (до утворення тріщин); в — для температур  $T > T^*$  (після утворення тріщин); 1 — залізобетонна оболонка; 2 — вкладка-пустотоутворювач; 3 — рідка субстанція; 4 — газоподібна субстанція з тиском  $P$ ; 5 — тріщини

Систему (1) за заданих граничних і початкових умов доцільно розв'язувати ітераційно. Тоді алгоритм розв'язання включатиме такі операції:

- завдання температурного поля  $T$ , яке задовольняє початкові умови;
- визначення за допомогою методу кінцевих елементів вектора переміщень (перше рівняння системи (1));
- визначення поля  $T$ , підставляючи знайдений вектор  $\{\bar{u}\}^0$  в (1);
- визначення нового вектора переміщень  $\{\bar{u}\}^h$ , за підставлення температурного поля  $T$  в (1);
- зіставлення вихідного вектора  $\{\bar{u}\}^0$  та нового вектора  $\{\bar{u}\}^h$  переміщень.

$$|u_k^0| - |u_k^h| \leq \varepsilon, \quad (2)$$

де  $k = 1, \dots, N$ ,  $N$  — кількість точок порівняння;  $\varepsilon$  — задана точність.

У разі виконання (2) процедура призупиняється. В іншому разі проводиться призначення  $\{\bar{u}\}^0 = \{\bar{u}\}^h$  і вся процедура повторюється знову до виконання (2).

### Чисельні дослідження

#### Структура чисельного дослідження

Об'єктом чисельного дослідження обрано квадратну в плані плиту з розміром грані 4 м, виготовлену з важкого бетону класу C25/30. Робоча арматура в кожному ребрі була такою: внизу — 1Ø14A400C, вгорі — 1Ø8A400C. Висота перетину плити — 300 мм; крок ребер — 1 м, а ширина ребра — 150 мм. Товщина верхньої і нижньої обшивки становила 50 мм. Загальне вертикальне навантаження, зокрема й власна вага, становили 10 кН/м<sup>2</sup>. Процедура чисельного дослідження містить послідовні етапи:

1. Визначення температурного поля в плиті перекриття під впливом високих температур під час нагрівання знизу за режимом стандартної пожежі.

2. Аналіз в скінченно-елементній постановці плоских перетинів плити в різні моменти часу із завданням вертикальних навантажень, діючої температури та надлишкового тиску від плавлення ППС, якщо таке могло бути в цей момент часу, з метою визначення моменту трансформації розрахункової схеми.

3. Визначення наведеної згинальної товщини плити перекриття і встановлення зусиль, що виникають унаслідок впливу температури в заданий момент часу і вертикального навантаження.

4. Визначення несучої здатності перетину плити відповідно до деформаційної методики, зазначеної в ДСТУ Б.В.2.6-156: 2010 [14] з урахуванням вимог EN 1992-1-2 [15], і зіставлення цих даних із зусиллями, що виникають.

Для створення моделей чисельного дослідження використані програмні комплекси, що ґрунтуються на використанні методу скінченних елементів (МСЕ). Конфігурація і розміри елементів у цих моделях визначаються на підставі тестових завдань, шляхом перевірки співвідносності методу скінченних елементів і оцінювання точності отриманих результатів.

#### Температурні поля

Температурні поля по перерізу плити перекриття у разі одностороннього нагрівання за режимом стандартної пожежі отримано в ПК «Ansys» [16] на об'ємній скінченно-елементній (СЕ) моделі. Визначено температурні поля для часу нагрівання від 0 хв до 240 хв. Але для плит перекриттів житлових і адміністративних будівель вимога вогнестійкості зазвичай становить R 60, тому для подальшого аналізу використовувалися температурні поля для часу не пізніше 60 хв. На рис. 5 показано розподіл температури по висоті перетину плити перекриття через 60 хв після впливу стандартної пожежі по товщині залізобетонного перерізу (ребро) і утеплювача (вкладка-пустототворювач).

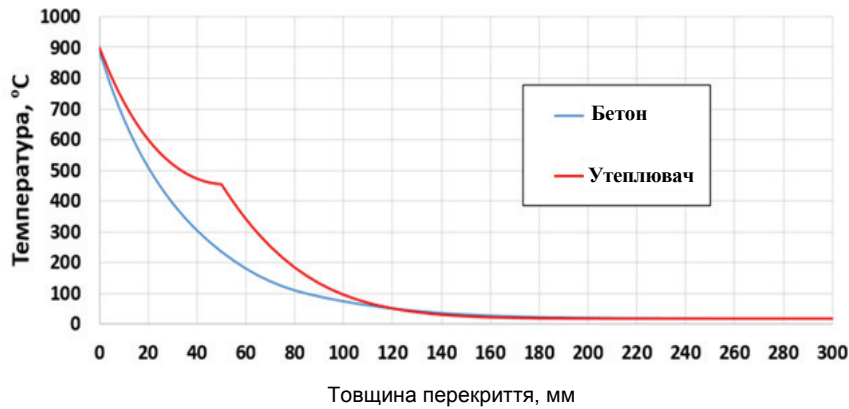


Рис. 5. Розподіл температури за висотою перетину плити перекриття через 60 хв при нагріванні в режимі стандартної пожежі

### Надмірний тиск під час нагрівання

З метою визначення впливу надлишкового тиску, що втрачається внизу утеплювача під час нагрівання, у ПК «Ліра-Сапр» розроблено 12 плоских моделей, створених з СЕ оболонки нульової гаусової кривизни, [17]. Кожна з СЕ моделей відображала перетин плити перекриття в певний момент часу (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60 хв). Відповідно до раніше отриманих полів температур у кожній СЕ моделі задавалася температура як навантаження. Крім цього до всіх моделей прикладено повне вертикальне навантаження, а в моменти часу, коли температура утеплювача досягала значень плавлення [11] (рис. 6), прикладався надлишковий тиск унаслідок плавлення утеплювача. Розрахунки показали, що після 30 хв у порожнині плити створювалося настільки великий надлишковий тиск, що напруги розтягнення для бетону С25/30 досягали граничних значень ( $f_{ctm} = 2,6$  МПа) (рис. 7).

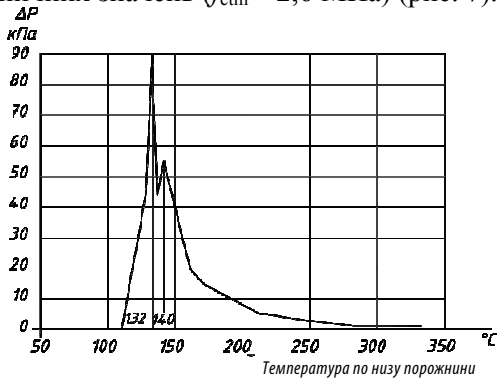


Рис. 6. Графік надлишкового тиску на рівні низу утеплювача при нагріванні [11]

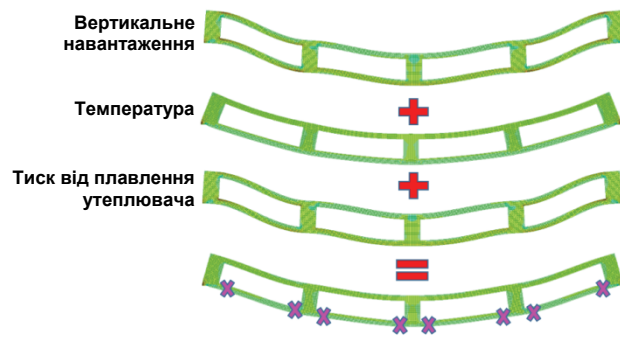


Рис. 7. Особливості деформування перетину плити перекриття після 30 хв стандартної пожежі

### Наведена товщина перекриття

Для отримання остаточних зусиль від спільного впливу вертикальних навантажень і температури розглядалася СЕ модель плити, виконана також із оболонок нульової гаусової кривизни. Наведена товщина плити визначалася за формулою

$$\frac{b_{eff} \Delta}{12} = I_x \Rightarrow \Delta = \sqrt[3]{\frac{12 I_x}{b_{eff}}}, \quad (3)$$

де  $b_{eff}$  — наведена ширина полиці перетину;  $I_x$  — задалегідь обчислений момент інерції перетину (рис. 8);  $\Delta$  — наведена товщина плити.

Приміром до впливу надлишкового тиску від плавлення утеплювача наведена товщина становила 27,4 см, а після порушення цілісності нижньої обшивки — 21,5 см.

На рис. 9 показано перетин плити перекриття: зліва до 30 хв у разі нагрівання за режимом стандартної пожежі, справа — після 30 хв.

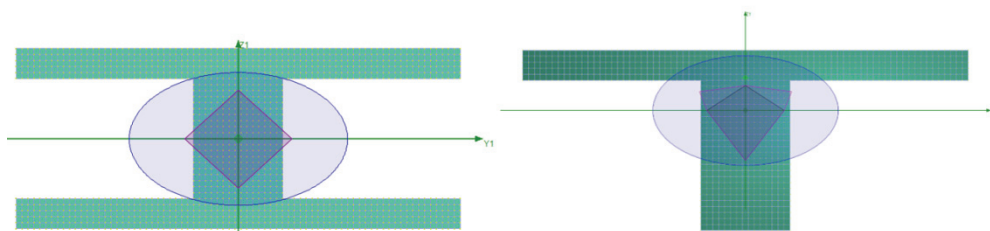


Рис. 8. Перетин плити перекриття з еліпсом інерції і ядром перетину

### Несуча здатність перетину за деформаційною методикою

Визначення несучої здатності перетинів, що зазнали впливу високих температур, проведено за деформаційною методикою, описаною в [14], а врахування впливу температур реалізовано за методом ізотерми 500 °С [15]. У цій методиці припускається, що у бетон, нагрітий понад 500 °С, не має відповідної міцності і жорсткості, а бетон, нагрітий до температури менше 500 °С, зберігає такі самі характеристики, як і у разі сталої температури. Фізико-механічні характеристики арматури задано з урахуванням несприятливого впливу температури, що діє в певний період часу (60 хв) у місці розташування арматурного включення. В наслідок цього отримані діаграми згинального моменту—кривизна (рис. 9) для наведеного перерізу. Чисельний експеримент розглядуваної плити перекриття архітектурно-будівельної системи «Монофант» довів відповідність межі вогнестійкості R 60. Вплив трансформації розрахункового перетину був незначним. Зниження несучої здатності склало близько 17 % порівняно з ненагрітою плитою.

Діаграма  $M(\text{кНм})$  —  $\kappa(1/\text{м})$

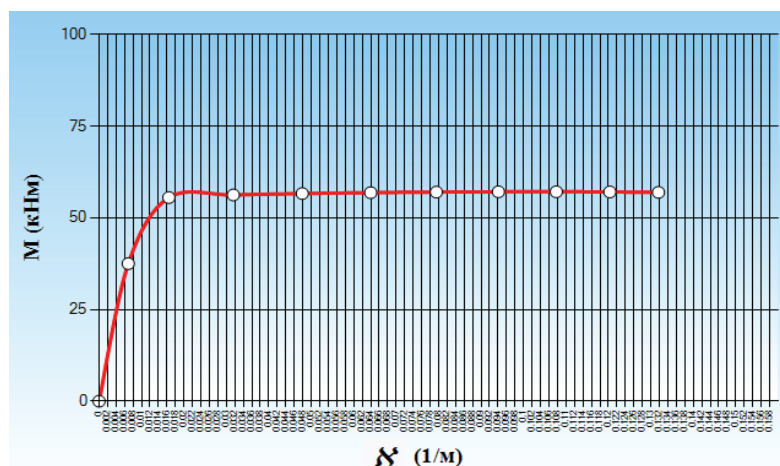


Рис. 9. Діаграма згинальний момент (кНм) — кривизна

### Висновки

1. Запропоновано алгоритм, який враховує трансформацію розрахункових схем залежно від величин температур і надлишкового тиску в порожнинах розташування утеплювача.
2. Отримано поля розподілу температур за висотою перетину плити нового типу архітектурно-будівельної системи «Монофант» при нагріванні за режимом стандартної пожежі для інтервалу часу 0...240 хв.
3. Розглянуто ПДВ плити нового типу архітектурно-будівельної системи «Монофант» під дією високих температур при нагріванні за режимом стандартної пожежі та з урахуванням змінювання розрахункової схеми. Встановлено відповідність цієї плити межі вогнестійкості R 60.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Патент на корисну модель № 89464. Каркасна будівля «Монофант» / Шмуклер В. С., Бабаєв В. М., Бугаєвський С. О., Бережна К. В., Карякін І. А., Кондращенко В. І., Сеїрські І. М. ; опубл. 25.04.2014, Бюл. № 8.

2. Full-scale testing of a damaged reinforced concrete frame in fire / [Umesh Kumar Sharma, Pradeep Bhargava, Bhupinder B Singh at al.] // Proceedings of the ICE // Structures and Buildings. — 2012. — Vol. 165. — P. 335—346.
3. Zhenhai Guo Experiment and Calculation of Reinforced Concrete at Elevated Temperatures / Zhenhai Guo, Xudong Shi. — Hardbound : Elsevier. — 2011. — 336 p.
4. Ervine A. Behaviour of Earthquake Damaged Reinforced Concrete Structures in Fire / Ervine A., Gille M., Pankaj Dr. // Structures in Fire: Proceedings of the Sixth International Conference. — Lancaster : Destech Publications, Inc., 2010. — P. 224—230.
5. Terro Mohamad J. Numerical modeling of the behavior of concrete structure in fire / Mohamad J. Terro // ACI Structural Journal. — 1998. — Vol. 95, No. 2. — P. 183—193.
6. Chen. Numerical analysis and simulation of space concrete frames under fire / Chen, S.-c. Ren, A.-z. Lu, X.-z. // Journal of Natural Disasters. — 2007. — P. 88—92.
7. Jie Zhao. A meso-level investigation into the explosive spalling mechanism of high-performance concrete under fire exposure / Jie Zhao, Jian-jun Zheng, Gai-fei Peng, Klaas van Breugel // Original Research Article Cement and Concrete Research. — November 2014. — Vol. 65. — P. 64—75.
8. Spalling of concrete structural walls exposed to fire / [Hedayati M. and others] // Mechanics of Structures and Materials: Advancements and Challenges. — CRC Press, 2016. — P. 971—976.
9. Hager I. Behaviour of cement concrete at high temperature / Hager I. // Technical Sciences. — 2013. — Vol. 61, № 1.
10. Composite behavior of concrete materials under high temperatures / [G. Xotta, G. Mazzucco, V. A. Salomoni, C. E. Majorana, and K. J. Willam] // International Journal of Solids and Structures. — 2015. — Vol. 64. — P. 86—99.
11. Шмуклер В. С. Каркасные системы облегченного типа / В. С. Шмуклер, Ю. А. Климов, Н. П. Бурак. — Харьков: Золотые страницы, 2008. — 336 с.
12. Лурье А. И. Теория упругости / А. И. Лурье. — М. : Наука, 1970. — 940 с.
13. Ландау Л. Д. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — М. : Наука, 1987. — 248 с.
14. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування: ДСТУ Б В.2.6-156:2010 [Чинний від 1.6.2011] — К. : Мінрегіонбуд України, 2011 — 118 с.
15. EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures — Part 1—2: General rules — Structural fire design / European committee for standardization. — 2004. — 97 p.
16. Сайт «Ansys Inc» [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.ansys.com>. (дата звернення 10.02.2017). — Назва з екрану.
17. Метод конечных элементов: теория и численная реализация. Программный комплекс «Лири-Windows» / [А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров, Е. Б. Стрелец-Стрелецкий и др.] — Киев : Факт, 1997. — 137 с.

Рекомендована кафедрою будівництва, міського господарства та архітектури ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 20.06.2017

**Гапонова Людмила Вікторівна** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри будівельних конструкцій; e-mail: [gaplyudmila@gmail.com](mailto:gaplyudmila@gmail.com) ;

**Резник Петро Аркадійович** — канд. техн. наук, старший викладач кафедри будівельних конструкцій. Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків

**L. V. Gaponova<sup>1</sup>**  
**P. A. Rezyk<sup>1</sup>**

## Research of Fire Resistance of Reinforced Concrete Plate of New Type

<sup>1</sup>O. M. Beketov National University of Urban Economy, Kharkiv

*A study of the stress-strain state of a new type of architectural and building system "Monophant" on the combined effect of vertical loads and on heating under the standard fire regime has been carried out. The temperature fields for the height of the section are obtained for all limits of fire resistance. There has been proposed the algorithm that takes into account the transformation of the design schemes depending on the temperature and overpressure in the cavities of the insulation.*

**Keywords:** fire resistance; slab; temperature, architectural and building system "Monophant".

**Gaponova Liudmyla V.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Building Construction, e-mail: [gaplyudmila@gmail.com](mailto:gaplyudmila@gmail.com) ;

**Rezyk Petro A.** — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Building Construction

**Л. В. Гапонова<sup>1</sup>**  
**П. А. Резник<sup>1</sup>**

## **Исследование огнестойкости железобетонной плиты нового типа**

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова

*Проведено исследование напряженно-деформированного состояния нового типа архитектурно-строительной системы «Монофант» под совместным воздействием вертикальных нагрузок и при нагреве по стандартному режиму пожара. Получены поля температур по высоте сечения для всех пределов огнестойкости. Предложен алгоритм, учитывающий трансформацию расчетных схем в зависимости от величин температур и избыточного давления в полостях расположения утеплителя.*

**Ключевые слова:** огнестойкость, температура, архитектурно-строительная система «Монофант».

**Гапонова Людмила Викторовна** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций; e-mail: gaplyudmila@gmail.com ;

**Резник Петро Аркадійович** — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры строительных конструкций