

УДК 624.012.45

**ПРО ОДНУ МОЖЛИВІСТЬ ОЦІНЮВАННЯ ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ
КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ПОЖЕЖІ**

Канд. техн. наук П. А. Резнік, д-р техн. наук В. С. Шмуклер, асп. Мохамад Альмохамад

**ON ONE POSSIBILITY OF THE ASSESSMENT OF PROGRESSIVE COLLAPSE OF
STRUCTURES IN FIRE**

PhD (Tech.) P. Reznik, D. Sc. (Tech.) V. Shmukler, Postgraduate Student M. Almohamad

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.191.2020.217291>

***Анотація.** У статті запропоновано алгоритм визначення відповідальних елементів при прогресуючому обваленні будівлі від впливу пожежі. Алгоритм заснований на застосуванні максимально гнучких розрахункових схем та ітераційної процедури енергетичних портретів будівлі за критерієм Василькова-Шмуклера. Реалізація алгоритму продемонстрована на прикладі визначення відповідальних елементів реального житлового комплексу в м. Львові. За результатами складання 15 сценаріїв надзвичайного впливу пожежі на одну з будівель виявлено найбільш небезпечний сценарій аварії для всього комплексу в цілому.*

***Ключові слова:** відповідальний елемент, прогресуюче обвалення, пожежа, система «Монофант», вогнестійкість.*

***Abstract.** The paper proposes an algorithm for determining the responsible elements in the progressive collapse of a building in fire. The algorithm is based on the use of the most flexible calculation schemes and iterative procedure of energy portraits of the building according to the Vasilkov-Shmukler criterion. The implementation of the algorithm is demonstrated on the example of determining the responsible elements of a real residential complex in Lviv. The object of the study is the residential complex «America», which consists of two 17-storey paired blocks and a block of two-storey shopping centre, located between them. Structurally, each of two buildings is a monolithic reinforced concrete frameless structure with voided overlappings made according to «Monofant» technology. At the beginning, all the initial data related to the structural scheme of the building are collected and systematized, such as geometric parameters, physical and mechanical characteristics of materials, engineering and geological conditions, loads and impacts. Then the computational model of the building is created. Herein the «Lira» software based on finite element method is used. Based on the results of the generated initial data and the building model, a static calculation is performed. After verification of compliance with the requirements for structures of the 1st and 2nd groups of limit states, the analysis of possible fire scenarios and modes is performed. The next step is determination of temperature fields, which gives the possibility to generate temperature loads. In general, 16 separate downloads were formed. The first download included all vertical loads from static calculation, and the next 15 downloads - all vertical loads and 1 different temperature load. The main aspect in the proposed algorithm is the criterion for selecting the responsible elements based on the approach of building of energy portrait of structure. After Vasylkov-Shmukler criterion, it is proposed to determine the values of the strain energy density for each finite element and strain energy of the whole system. According to the results of compiling 15 scenarios of emergency fire on one of the buildings and determining the largest values*

of strain energy density, the most dangerous accident scenario for the whole complex was identified.

Keywords: responsible element, progressive collapse, fire, «Monofant» system, fire resistance.

Вступ. Щорічне зростання кількості аварій внаслідок пожеж, терористичних актів, вибухів побутового газу і просто видалення опор при наїзді автотранспорту, які не були передбачені на стадії проектування, але викликали обвалення окремих конструкцій, а в деяких випадках – і всієї будівлі, ставить за мету забезпечення конструктивної безпеки і живучості споруд досить гостро. Для абсолютної більшості будівельних об'єктів сприйняття таких «особливих впливів» не передбачалося, оскільки вони належать до аварійних ситуацій, врахування яких суттєво збільшило б вартість проектних робіт. Загальновідомо, що на попередження аварій необхідно значно менше коштів, ніж на їх ліквідацію. Так, за даними іноземних дослідників, середньостатистичний розмір збитків від руйнування будівлі оцінюється в 684,5 % при його 100 % вартості. У зв'язку зі збільшенням останнім часом кількості аварій будівель і споруд в результаті помилок проектування та зведення, порушення правил експлуатації і високого ступеня зносу експлуатованих об'єктів капітального будівництва сьогодні вимагають розроблення принципово нові концепції захисту будівельних об'єктів від прогресуючого обвалення.

Для забезпечення живучості будівлі до прогресуючого руйнування необхідно мати методику щодо визначення відповідального елемента. Згідно з ДБН В.1.2-14:2018 *відповідальним* називають елемент, руйнування якого призводить до руйнування або загрози руйнування споруди в цілому. Правильнішим було б формулювання «*відповідальні елементи*», тому що поліморфізм віртуальних руйнувань зумовлюється більш складними процесами, що породжують аварії. Закономірно, що при різних видах аварій відповідальні елементи будівель

відрізнятимуться. Тому побудова алгоритму виявлення відповідального елемента будівель і споруд для якісного оцінювання прогресуючого обвалення є актуальним та своєчасним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз теоретичних і експериментальних досліджень у сфері прогресуючого обвалення каркасних залізобетонних будівель свідчить про недостатню вивченість проблеми. Більш того, практично відсутні рекомендації з проектування сценаріїв надзвичайних ситуацій, зокрема пожеж. А в діючих вітчизняних нормативних документах взагалі відсутні рекомендації щодо розрахунку на можливість прогресуючого обвалення.

Визначення терміна «прогресуюче (лавиноподібне, непропорційне) обвалення» зустрічається в нормативних документах багатьох країн. Проте серед них відрізняються не лише власне визначення «прогресуючого обвалення», але й допустимі його розміри. Деякі визначення вказують на поширення руйнувань від місцевого до загального, тобто на зміну стану будівлі в часі, а інші тільки констатують факт руйнувань і встановлюють їх розміри.

Узагальнюючи положення нормативних документів різних країн, можна виділити два сформованих підходи захисту від «прогресуючого» обвалення. Відповідно до першого підходу (англ. Indirect method) необхідно використовувати непрямі заходи захисту, другого (англ. Direct method) – слід враховувати здатність ключових елементів (англ. Specific local resistance method або key element design) сприймати ушкоджуючі впливи (вплив високих температур, вибухи газу, бомб; ударні навантаження від транспортних засобів, літаків і т. д.) і (або) здатність

конструкції перерозподіляти навантаження при відмові елемента (англ. alternate load path method, bridging method).

У більшості нормативних документів різних країн для розрахунку монолітних житлових будинків рекомендується використовувати просторову розрахункову модель. Розрахункова модель будівлі має передбачати можливість видалення (руйнування) окремих вертикальних конструктивних елементів. Видалення одного або декількох елементів змінює конструктивну схему і характер роботи елементів, які примикають до місця руйнування або завислих над ним, що необхідно враховувати при визначенні характеристик жорсткості елементів і їх зв'язків. Розрахункова модель будівлі має бути розрахована окремо з урахуванням кожного (одного) з локальних руйнувань.

Розрахунок будівлі можна виконувати з використанням різних програмних комплексів, у тому числі заснованих на методі скінченних елементів. Використання програмних комплексів, що допускають можливість урахування фізичної та геометричної нелінійності характеристик жорсткості елементів, забезпечує найбільшу достовірність результатів розрахунку і зниження додаткових матеріалозатрат.

Проте жодних рекомендацій щодо визначення ключових елементів при розглянутих сценаріях надзвичайних ситуацій як у вітчизняних нормативних документах, так і нормативних документах зарубіжних країн не виявлено.

За минулі роки на тему прогресуючого обвалення було написано величезну кількість робіт. Зокрема в статті [1] було проведено натурний експеримент на реально існуючому 20-поверховому залізобетонному будинку та вивчено розподіл власної ваги і можливість прогресуючого обвалення. Видалення колони середнього ряду першого поверху не призвело до прогресуючого руйнування. Дані випробувань зіставлені з результатами

аналітичного аналізу за допомогою МСЕ та показали задовільний збіг.

В роботі [2] пропонується сіткова модель для аналізу поведінки руйнування монолітних залізобетонних безригельних каркасних будинків з урахуванням фізичної нелінійності бетону й арматури.

У статті [3] наведені дані з експериментального дослідження руйнування залізобетонної будівлі на 6 моделях у масштабі 1:10.

В роботі [4] аналізується досвід пожеж в попередньо напружених залізобетонних конструкціях, в тому числі і пожежа в каркасному будинку.

Аналіз та узагальнення згаданих наукових робіт, а також наявної вітчизняної та іноземної нормативної бази дозволили сформулювати мету і завдання даного дослідження.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є побудова алгоритму виявлення відповідального елемента будівель і споруд для якісного оцінювання прогресуючого обвалення під час пожежі. *Об'єкт дослідження* – вогнестійкість безригельної каркасної монолітної залізобетонної будівлі при розгляді багатьох варіантів пожежі. *Предмет дослідження* – процеси поширення температури і формування напружено-деформованого стану в залізобетонних будівлях, що можуть викликати прогресуюче обвалення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати чисельний аналіз монолітного каркасного будинку з використанням методу скінченних елементів для виявлення відповідального елемента і визначення його несучої здатності при надзвичайній дії пожежі;

- отримати і дослідити нестационарні температурні поля в перерізах основних несучих конструкцій споруди і використати їх для формування додаткового навантаження;

- оцінити ефективність енергетичних критеріїв для виявлення відповідальних елементів при багатоваріантних аварійних ситуаціях.

Основна частина дослідження. Для вирішення поставленого в роботі завдання з побудови алгоритму визначення відповідального елемента при прогресуючому обваленні внаслідок пожежі моделювання віртуальної аварійної ситуації виконано на прикладі реально існуючої багатоповерхової житлової будівлі.

Об'єктом дослідження виступає житловий комплекс «Америка» (м. Львів), що складається з двох 17-поверхових спарених блоків і блока двоповерхового торговельного центру (рис. 1, а), що розташований між ними. Конструктивно

кожна з двох будівель являє собою монолітний залізобетонний безригельний каркас (рис. 1, б) з перерізом колон 400×400 мм, 400×800 мм, 400×700 мм, 400×600 мм і плит перекриттів товщиною 300 мм, що зроблені з використанням пінополістирольних вкладишів-пустотоутворювачів (система «Монофант»).

На рис. 2 наведено запропонований алгоритм знаходження відповідальних елементів та перевірки стійкості до прогресуючого руйнування при пожежі. В основі алгоритму лежить побудова максимально гнучких розрахункових схем та ітераційна процедура енергетичних портретів будівлі за критерієм Василькова-Шмуклера.



Рис. 1. Поперечний переріз (а) та фото реалізованих (б) розглянутих будівель ЖК «Америка»

1. На початковому етапі збираються та систематизуються всі вихідні дані, що належать до конструктивної схеми будівлі: геометричні параметри, фізико-механічні характеристики матеріалів, інженерно-геологічні умови, навантаження і впливи.

Зокрема житловий комплекс «Америка» характеризується такими параметрами:

- категорія складності споруди – V;
- клас наслідків – СС2;
- ступінь вогнестійкості споруди – І;
- кліматичний район – І;
- температура зовнішнього повітря холодної п'ятиденки – 254 К (-19 °С);
- вітровий район – ІІІ; нормативний вітровий тиск – 520 Па (52 кг/м²);

• сніговий район – I; снігове навантаження – 1310 Па (131 кг/м²).

2. На наступному етапі створюється розрахункова модель будівлі. Скінченно-елементну модель каркасу будівлі,

отриману через імпорт попередньої тривимірної моделі в ПК «Ліра Сапр 2019» [5], наведено на рис. 3. Загальний розмір моделі 127284 скінченних елементів (СЕ) і 114577 вузлів.

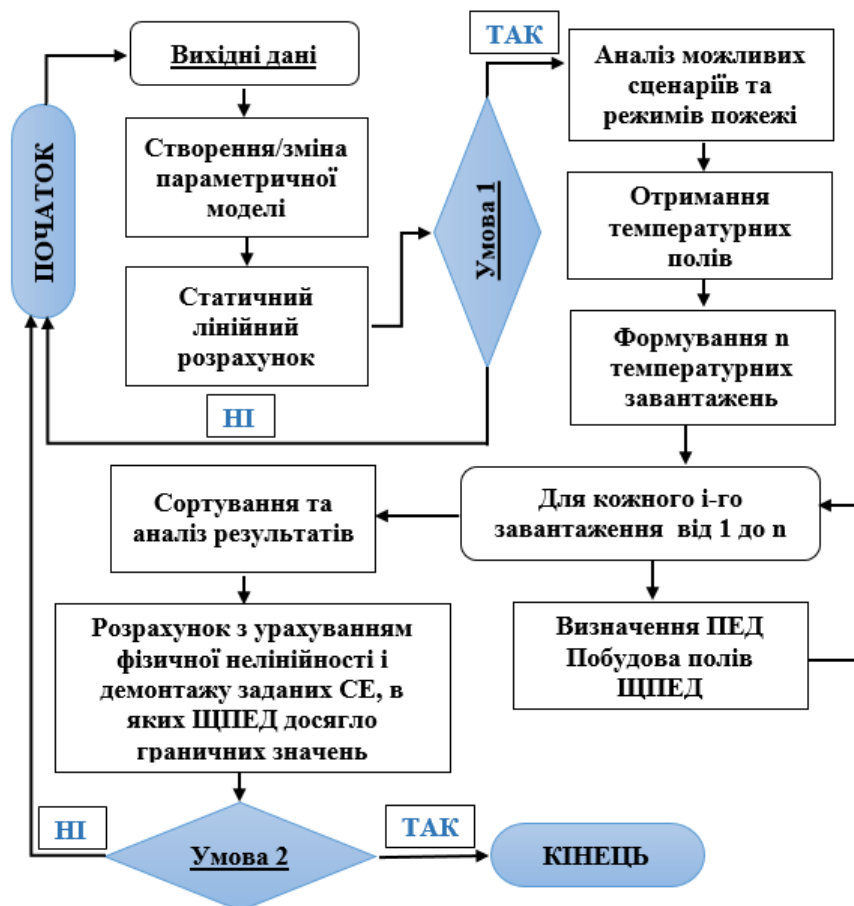


Рис. 2. Пропонований алгоритм визначення відповідального елемента

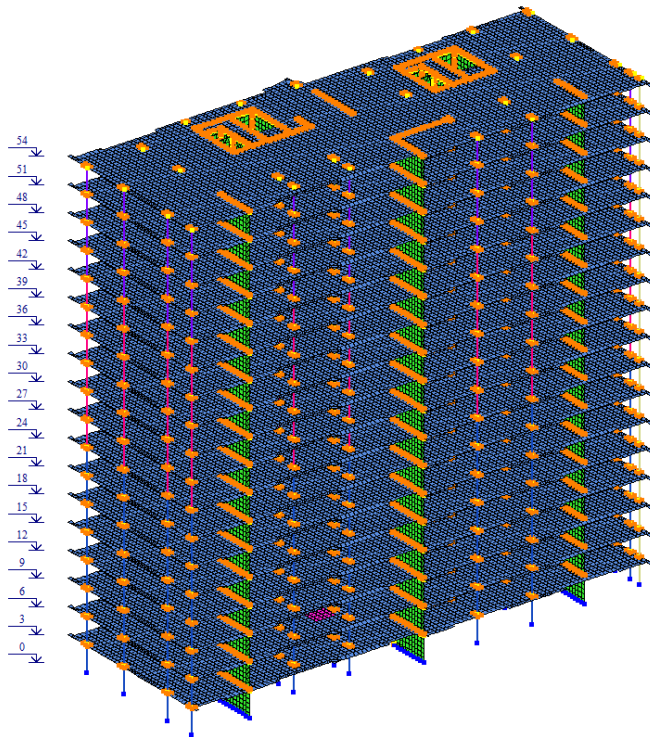


Рис. 3. SE модель будівлі

Беручи до уваги те, що поставлене завдання передбачає часту зміну геометричних параметрів, модель будівлі має реалізовувати підхід BIM (Building Information Modeling), а саме всі геометричні властивості об'єкта і навантаження повинні бути максимально параметризованими. У зв'язку з цим для даного об'єкта обрана система «Сапфір-Генератор», оскільки вона забезпечує безпосередній зв'язок з розрахунковими комплексами і має достатній для поставлених завдань функціонал.

3. Далі виконується статичний лінійний розрахунок. За результатами сформованих вихідних даних і моделі будівлі виконується статичний розрахунок. На цьому етапі всі властивості матеріалів задаються постійними. У даній роботі було сформовано 20 розрахункових сполучень навантажень (РСН), з них 8 перших основних сполучень, 4 других основних сполучень та 8 аварійних сейсмічних поєднань. На даному етапі важливе виконання умови 1 – перевірка задоволення вимог, що ставляться до конструкцій по 1-й і 2-й групах граничних станів [6].

4. Аналіз можливих сценаріїв і режимів пожежі. Тільки після уточнення всіх прийнятих конструктивних рішень в пунктах 1–4 слід починати розгляд можливих сценаріїв і режимів пожежі за ДБН В.1.2-14: 2018.

Складання переліку можливих подій, які можуть спричинити аварійний стан, дає можливість визначити найбільш імовірні причини та місця виникнення небезпечних явищ, а також розробити заходи з підвищення стійкості несучих конструкцій при аварії (поділом об'єкта на відокремлені частини, встановленням дублюючих конструкцій чи додаткових в'язей).

У даній роботі розглядалися лише сценарії аварійних ситуацій, пов'язані з пожежею. На наш погляд, всі сценарії мають бути детерміновані для даного об'єкта і обов'язково включати до себе всі особливості конкретної надзвичайної ситуації. Наприклад, автори даної статті вважають за необхідне враховувати температурні зусилля, які з'являються в елементах конструкції внаслідок нагріву, а не лише знижувати фізико-механічні властивості матеріалів під час пожежі. Також має бути прорахована можливість

появи інших НС внаслідок впливу даної (вибух внаслідок пожежі).

Автори вважають підхід [7], реалізований в нормах різних країн, коли до колон та перекриттів пред'являють різні межі вогнестійкості REI 120 та REI 60 (для ЖК «Америка»), некоректним. Тому що на межу вогнестійкості всієї будівлі не безпосередньо впливають межі вогнестійкості окремих конструкцій. Так, при можливому обваленні одного або декількох перекриттів можливість колон і діафрагм продовжувати забезпечувати цілісність і просторову жорсткість всієї будівлі є сумнівною. Тому потрібне комплексне оцінювання. Для будівлі, розглянутої в даному аналізі, встановлена межа вогнестійкості і для перекриттів, і для колон REI 60.

Актуальним питанням також є визначення площі вогнища пожежі. Адже діючі нормативні документи дають лише чіткі вказівки щодо зниження фізико-механічних властивостей матеріалів, задавання режимів пожежі, залежно від яких будуть визначені температурні поля в перетинах конструкцій. Цього достатньо з застереженнями для розрахунку окремої конструкції, але абсолютно не підходить при аналізі частини або всієї будівлі, особливо в даній роботі, де розглядається

монолітна залізобетонна будівля. Тому що необхідно враховувати, як будуть розподілятися додаткові температурні зусилля в багато разів статично невизначеній конструкції, як буде відбуватися перерозподіл зусиль внаслідок зміни жорсткостей окремих елементів будівлі або навіть виходу їх з ладу. Більш того, логічно припустити, що температура реальної пожежі буде неоднакова в центрі вогнища і на його межах. Площа вогнища залежить від пожеж-ного навантаження в кожному з приміщень, планувального рішення і системи вентиляції. Для відносно точного обчислення цієї площі використовується обчислювальна гідродинаміка. Але навіть з урахуванням всіх особливостей процесу пожежі його швидкість поширення є суто стохастичним значенням. Визначення площі пожежі є окремим складним і актуальним завданням.

5. Визначення температурних полів. Виконано з використанням вбудованих сателітів ПК «Ліра-Сапр» [5] (рис. 4). При розрахунку конструкцій на вогнестійкість здійснюється підбір і перевірка арматури з урахуванням зниження міцнісних і деформаційних характеристик бетону та арматури в результаті заданого вогневого впливу [7-8].

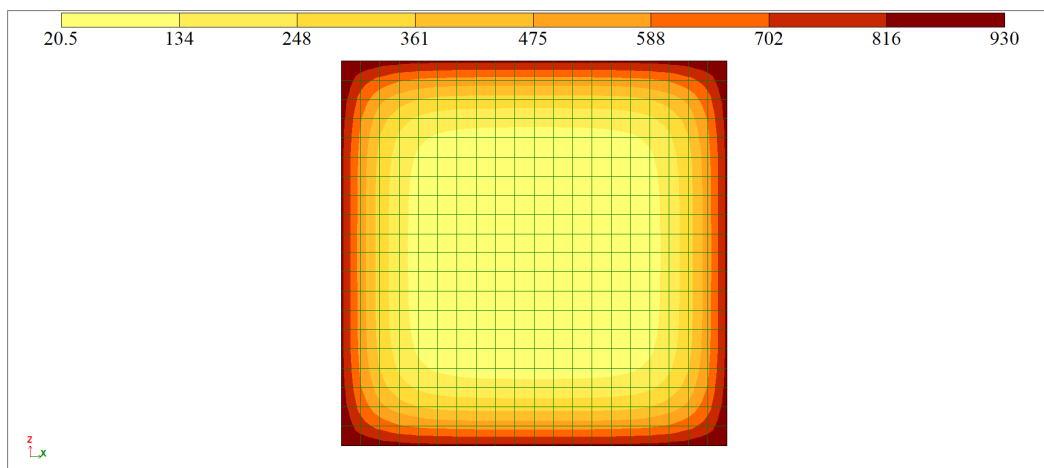


Рис. 4. Відображення температурних ізополів перерізу колони розглянутої будівлі (вогневий вплив з чотирьох сторін), °С

б. Формування температурних навантажень. Для моделювання загального алгоритму аналізу всієї будівлі підвищені температури були задані відповідно до режиму стандартної пожежі через 60 хв. Площа пожежі – 9 м². Розподіл температури пожежі по площі прийнято однаковим.

Остаточно сформовано 16 окремих навантажень. Перше навантаження включало всі вертикальні навантаження з пункту 3, а наступні 15 навантажень – всі

вертикальні навантаження і 1 температурне навантаження. Для використання температурних полів, отриманих в пункті б, навантаження застосовано підхід, зазначений у роботах [8-10].

15 навантажень з температурними навантаженнями задані у п'яти різних точках (рис. 5) у плані плити перекриття в трьох різних ярусах, де відбувається зміна перерізу пілонів 400×800 мм, 400×700 мм, 400×600 мм.

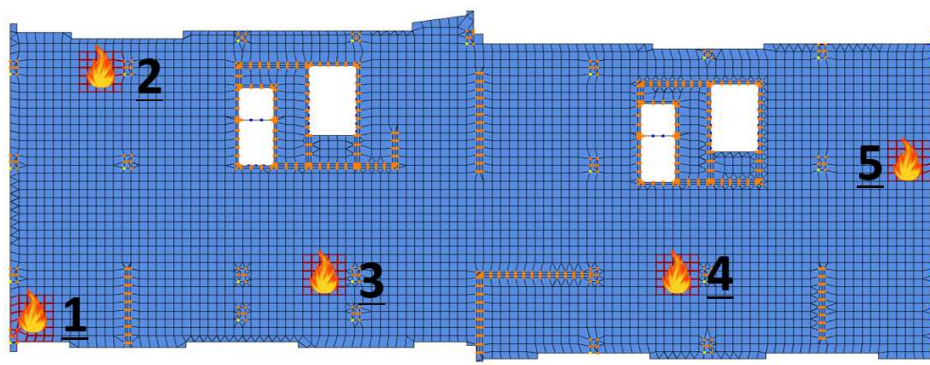


Рис. 5. Віртуальні осередки виникнення пожежі в ЖК

Визначення потенційної енергії деформацій (ПЕД) і отримання полів щільності ПЕД

Центральним аспектом в запропонованому алгоритмі є критерій вибору відповідальних елементів. Пропонується визначати щільність

потенційної енергії деформації для кожного скінченного елемента (ЩПЕД) та потенційної енергії деформації всієї системи (ПЕД) на базі критерію Василькова-Шмуклера. Граничне значення ЩПЕД визначається за формулою

$$e_u = 0,5\chi_\sigma^2[(\chi_\sigma + 1)e_{nc} + (\chi_\sigma - 1)e_{nt}] + (1 - \chi_\sigma^2)e_{nsh}, \quad (3)$$

де $\chi_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ – параметр Лоде-Надаї напружено-деформованого стану;

e_c, e_t, e_{sh} – щільність потенційної енергії при стисканні, розтягненні та зсуві відповідно.

Даний підхід базується на порівнянні граничного значення з поточним значенням ЩПЕД. Якщо в скінченному елементі $e_i > e_{iu}$, то він виключається зі схеми моделі.

Маючи в розпорядженні алгоритми, що встановлюють послідовне об'єднання суміжних відбракованих елементів, з'являється можливість побудови поверхонь розчленування (руйнування) конструкції, тобто встановлення послідовності переходу від руйнування в локальній області до глобального віртуального колапсу.

7. Сортування та аналіз результатів. На даний момент обчислення ПЕД і ЩПЕД

реалізовано в програмному комплексі Ліра 10.6. Тому реалізація вищенаведеної процедури не викликає складнощів. Отримані значення ПЕД для всіх 16 варіантів сортувалися і вибиралися найгірші варіанти. На рис. 6 наведено

графік ПЕД для всіх 16 навантажень. На рис. 7 подано ранжування за ПЕД тільки навантажень з температурними навантаженнями.

На рис. 8 зображено визначення граничного і поточного значень ЩПЕД.

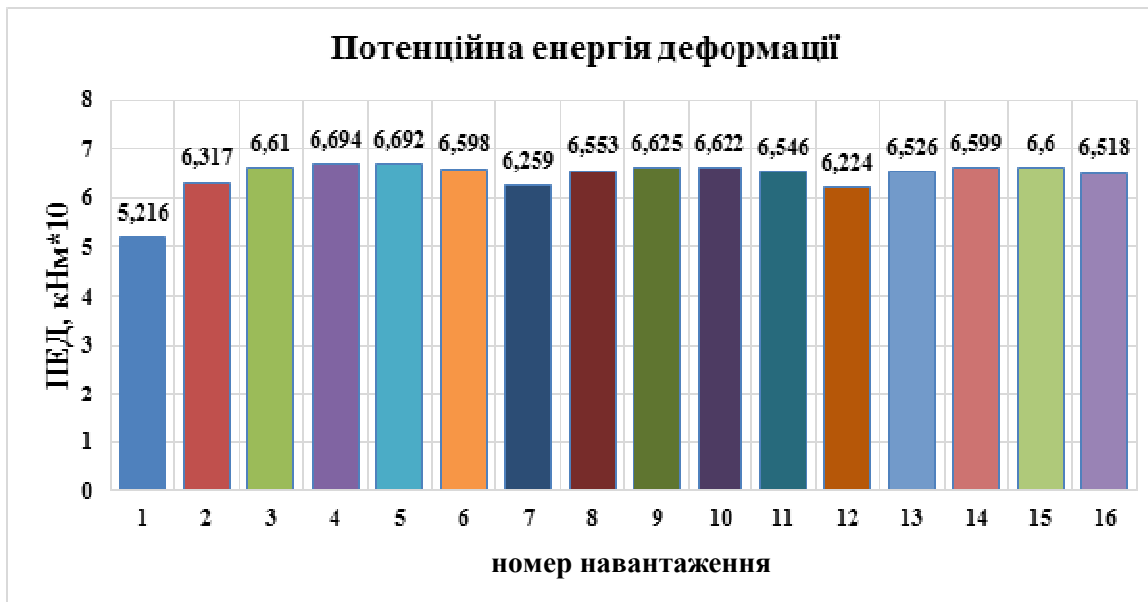


Рис. 6. Значення потенційної енергії деформації для всіх розглянутих варіантів

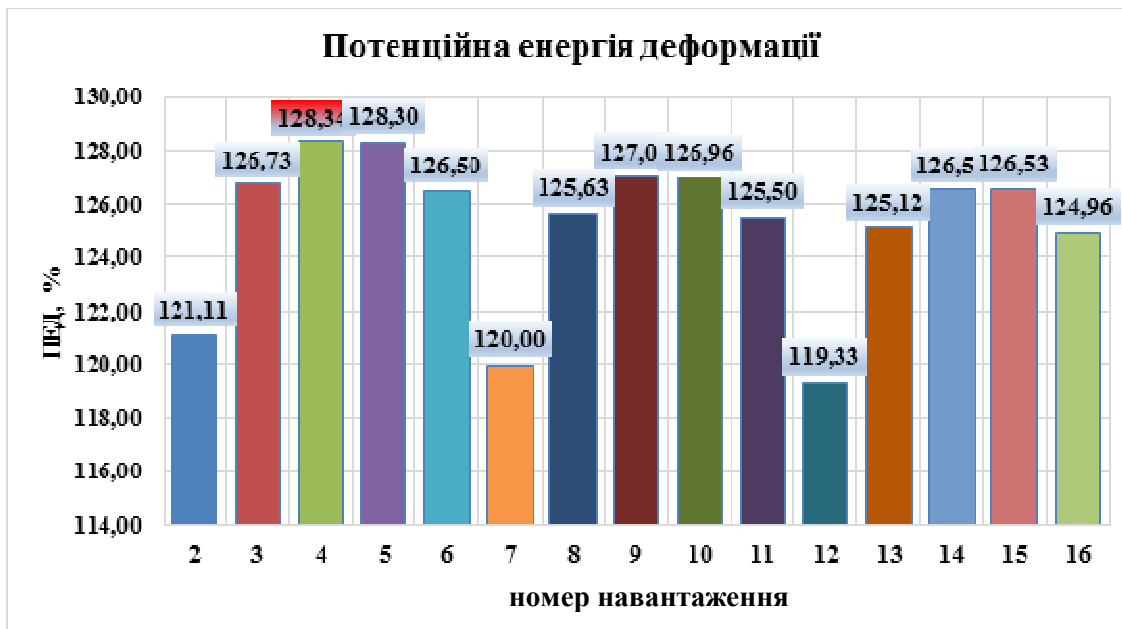


Рис. 7. Ранжування значень потенційної енергії деформації для температурного навантаження

а)

б)

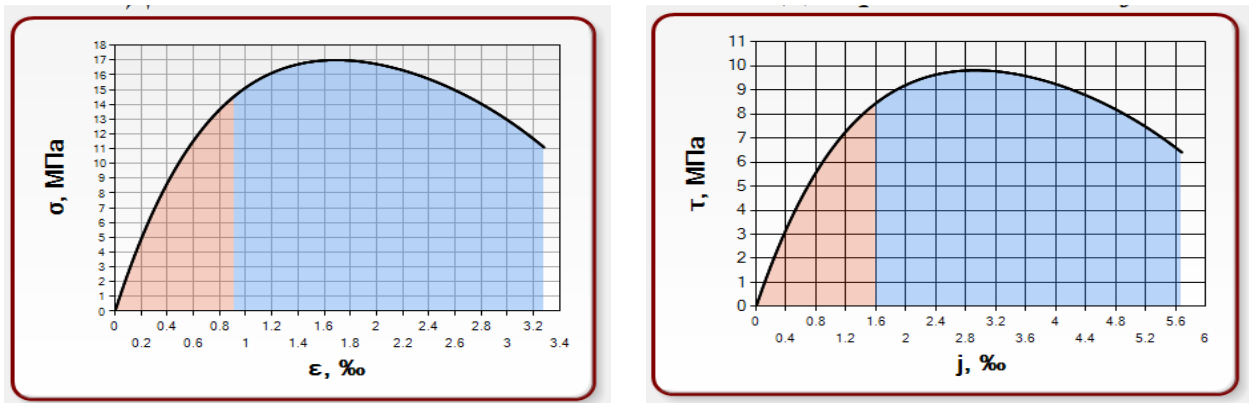


Рис. 8. Діаграми стискання (а) та зсуву (б) для бетону класу С25/30 для визначення ЩПЕД

Як видно з рис. 6, варіантами з найбільшими значеннями ПЕД виявилися навантаження № 4 і № 5. Це навантаження на найнижчому ярусі. Різниця між ними складає всього 0,04 %. Даний аспект говорить про те, що розрахунок і аналіз мають проводитися не тільки для варіанта з найбільшим значенням, але й для інших, якщо різниця між ними не перевищує заданої Δ . У цій роботі в подальшому проводився аналіз навантаження № 4.

Після ранжування і вибору розглянутого сценарію пожежі слід провести аналіз полів ЩПЕД. На рис. 9 наведені поля щільності потенційної енергії для навантаження № 4. СЕ з граничним значенням ЩПЕД видаляються з розрахункової схеми на наступному етапі.

8. На останньому етапі перевіряється задоволення вимог, що ставляться до

конструкцій для конкретного аварійного сценарію з урахуванням особливих вимог нормативних документів. Наприклад, під час пожежі приймається понижуючий коефіцієнт на корисне навантаження, що в даному випадку дорівнює 0,7. За результатами аналізу ЩПЕД, колона, піддана вогневому впливу, не вийшла з ладу. З розрахункової схеми були виключені СЕ плити перекриття сумарною площею 2,5 м². Обмеження по другому граничному стану не розглядалися. Результати показали, що в будівлі не спостерігається розвиток лавиноподібних процесів виключення зі схеми несучих елементів, окрім збільшення деформацій в місці розташування вогнища пожежі і в радіусі 3 м та додавання поздовжніх зусиль в пілоні.

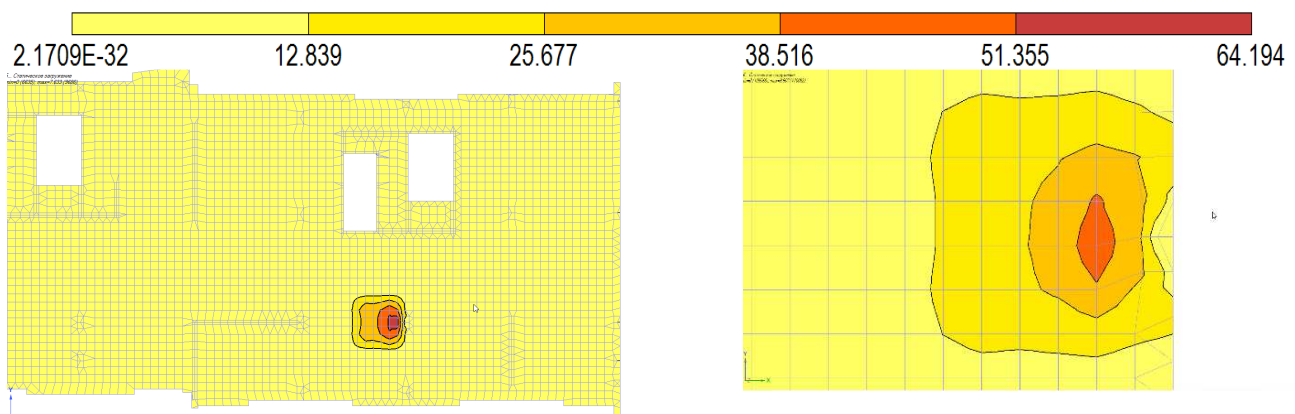


Рис. 9. Щільність ПЕД для варіанта № 4, кПа

Висновки:

1. Запропоновано алгоритм виявлення відповідального елемента будівель і споруд на базі енергетичного критерію Василькова-Шмуклера для аварійного впливу пожежі. Алгоритм дозволяє виявити «відповідальний» елемент конструкції будівлі і перевірити несучу здатність цього елемента без необхідності реалізації ітераційного процесу генерації окремих вогнищ пожежі у всіх можливих частинах будівлі.

2. Поданий алгоритм дозволяє провести чітку ідентифікацію відповідальних елементів і не є залежним від змін геометрії та граничних умов розрахункових схем, а також дає можливість враховувати, на відміну від існуючих алгоритмів, всі можливі розрахункові сполучення навантажень (РСН), включаючи й аварійні.

3. Отримано температурні поля для пілонів і колон перерізами 400×800 мм, 400×700 мм, 400×600 мм, а також для плити перекриття системи «Монофант» для стандартного режиму пожежі, що дозволяє сформулювати і задати додаткові температурні зусилля та врахувати локальне зниження фізико-механічних властивостей матеріалів.

4. Проведено верифікацію запропонованого алгоритму виявлення відповідального елемента будівлі на прикладі монолітності безригельної залізобетонної будівлі ЖК «Америка» у Львові. Складено 15 сценаріїв надзвичайного впливу пожежі та виявлено відповідно до енергетичних критеріїв найбільш небезпечний сценарій для всієї споруди в цілому.

Список використаних джерел

1. Mehrdad S., Serkan S. Gravity load redistribution and progressive collapse resistance of 20-storey reinforced concrete structure following loss of interior column. *ACI Structural Journal*. 2010. Vol. 107. № 6. P. 636-644.
2. Coronelli D. Grid model for flat-slab structures. *ACI Structural Journal*. 2010. Vol. 107. № 6. P. 645-653.
3. Bonelli P., Tobar R., Leiva G. Experimental study on failure of reinforced concrete building. *ACI Structural Journal*. 1999. Vol. 96. № 1. P. 3-8.
4. Maxia D., Porcu A., Porcu R., Tattoni S. Structural Behavior of Reinforced Pre-Compressed Concrete. Structures in Fire: Proceedings of the Sixth International Conference. Lancaster: Destech Publications, Inc., 2010. P. 294-300.
5. LIRA LAND: Розрахунок та проектування конструкцій. URL: <http://www.liraland.ua/>.
6. Практичний розрахунок елементів залізобетонних конструкцій за ДБН В.2.6-98:2009 в порівнянні з розрахунками за СНиП 2.03.01-84* і EN 1992-1-1 (Eurocode 2): довідк.-навч. посіб. / В. Н. Бабаєв, А. М. Бамбура, В. С. Шмуклер та ін.; за заг. ред. В. С. Шмуклера. Харків: Золоті сторінки, 2015. 240 с.
7. Garonova L., Grebenchuk S., Kalmykov O., Reznik P. Study of fire-resistance of reinforced concrete slab of a new type. *MATEC Web Conf.* Vol. 116, p02018. URL:

<https://www.matec->

[conferences.org/articles/matecconf/abs/2017/30/matecconf_tr2017_02018/matecconf_tr2017_02018](https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/abs/2017/30/matecconf_tr2017_02018/matecconf_tr2017_02018).

8. Демчина Б. Г. Вогнестійкість одно- і багатопарових просторових конструкцій житлових та громадських будівель: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. Харків, 2003. 302 с.

9. Ройтман В. М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. Москва: Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. 382 с.

10. Mohammad H., Shmukler V., Reznik P., Petrova O. On the criterion of the Limit State for Concrete. Proc. of the 12th fib International PhD Symposium in Civil Engineering (29 to 31 Aug. 2018. Czech Technical University in Prague). Prague, 2018. P. 593–599.

11. Фомин С. Л., Наджафи Рухоллах. Огнестойкость монолитных каркасных зданий с учетом пространственной работы. *Науковий вісник будівництва*. Харків: ХДТУБА, ХОТВАБУ, 2007. Вип. 42. С. 159-164.

Резнік Петро Аркадійович, канд. техн. наук, старш. викладач кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0003-3937-6833. E-mail: engipr@gmail.com.

Шмуклер Валерій Самуїлович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-8670-0731. Тел. (057) 707 33 77. E-mail: bk@kname.edu.ua.

Мохамад Альмохамад, аспірант кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-3715-7437. E-mail: engipr@gmail.com.

Petro Reznik, PhD (Tech), senior lecturer, Building Structures department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0003-3937-6833. E-mail: engipr@gmail.com.

Valerii Shmukler, D. Sc. (Tech.), Professor, Head of the Building Structures department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0002-8670-0731. E-mail: bk@kname.edu.ua.

Mohamd Almohamad, postgraduate student, Building Structures department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0002-3715-7437. E-mail: engipr@gmail.com.

Статтю прийнято 15.09.2020 р.