
БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 624.012.45

АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ІСНУЮЧИХ БУДІВЕЛЬ ЖИТЛОВОГО ФОНДУ МІСТА ХАРКОВА ЩОДО ЇХНЬОЇ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ВНАСЛІДОК ВПЛИВУ БОЙОВИХ ДІЙ

Канд. техн. наук П. А. Резнік, аспіранти М. Альмохамад, В. В. Тенесеску

ANALYSIS OF CONSTRUCTIVE SOLUTIONS OF THE EXISTING BUILDINGS OF THE HOUSING FUND OF THE KHARKIV CITY ON THE SUBJECT OF THEIR PERFORMANCE AS A CONSEQUENCE OF THE INFLUENCE OF COMBAT ACTIONS

PhD (Tech.) P. Reznik, postgraduate students M. Almohamad, V. Tenesesku

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.201.2022.267755>



***Анотація.** У статті наведено огляд основних конструктивних рішень існуючих житлових будівель м. Харкова та проаналізована їхня працездатність з точки зору стійкості до вибухових впливів і, як наслідок, прогресуючого обвалення. Зазначається, що з кожним роком зацікавленість світової наукової спільноти в питаннях прогресуючого обвалення зростає, оскільки, на превеликий жаль, збільшується кількість випадків лавиноподібного обвалення споруд різних типів. Разом з тим відмічається, що вітчизняні норми поки що не конкретизують методiku розрахунку будівель до прогресуючого обвалення, а наявні методи експериментального та чисельного аналізу все ще потребують доопрацювання. На базі виконаного аналізу конструктивних рішень житлової забудови м. Харкова виокремлено тип будівель, який, на думку авторів статті, має найбільший ресурс, і надано стислі рекомендації щодо його підвищення в майбутньому.*

***Ключові слова:** працездатність, прогресуюче обвалення, відповідальний елемент, конструктивні рішення, укриття.*

***Abstract.** The article examines the main structural solutions of existing residential buildings in the city of Kharkiv and analyzes their working capacity from the point of view of resistance to explosive effects and, as a result, progressive collapse. It is known that progressive collapse is characteristic of extreme (emergency) cases, when due to destruction of a responsible element of the structure as a result of a gas explosion, ammunition bursts, climatic cataclysms, transport collapses, etc a part of the building or the entire structure collapses. It is noted that every year, the interest of the world scientific community in the issues of progressive collapse is growing, because, unfortunately, the number of cases of avalanche-like collapse of buildings of various types is increasing. This was facilitated by already known cases of collapses of various objects, such as the Ronan Point residential building (Great Britain) in 1968 or the buildings of the World Trade Center (USA) in 2011, or the very recent case of the collapse of a residential building in Surfside (USA) in 2021. At the same time, it is noted that domestic regulations do not yet specify the methodology for calculating buildings before progressive collapse, and the existing methods of experimental and numerical analysis still need to be refined. Unfortunately, the list of such objects is increasing, and today, Ukraine has added to it numerous destroyed buildings as a result of ongoing hostilities on its territory. Therefore, for our country in the current conditions, the issue of ensuring the future stability*

of all buildings, and in particular, the housing stock against progressive collapse, is an urgent issue. On the basis of the analysis of the constructive solutions of the housing development in the city of Kharkiv, the type of buildings that, according to the authors of the article, has the greatest resource, is singled out, and brief recommendations are given for its increase in the future.

Keywords: *working capacity, progressive collapse, the responsible element, constructive solutions, shelter.*

Вступ. Екстремальні умови навантаження внаслідок бойових дій, такі як удар чи вибух, що можуть призводити до значних руйнувань або повного обвалення будинку, зазвичай не враховуються в поточній практиці проєктування та аналізу конструкцій. На сьогодні в українському нормативному полі наявні декілька документів, що регламентують необхідність врахування прогресуючого обвалення споруд, – це ДБН В.2.2-41:2019 «Висотні споруди» [1] і ДБН В.1.2-14:2018 «Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд» [2], однак, яким саме має бути алгоритм розрахунку споруди і чим керуватись проєктувальникам, поки що невідомо. Заплановані до випуску 2022 р. ДСТУ з розрахунку на прогресуюче обвалення та оцінювання залишкового ресурсу об'єктів будівництва поки що, враховуючи останні події, залишаються на стадії «проєкту». Однак вже сьогодні стає зрозумілим, що для сфери українського будівництва обов'язковим має стати врахування стійкості до прогресуючого обвалення не лише для будівель підвищеної поверховості, але й для звичайних житлових і громадських будівель по всій країні.

Коли конструкції зазнають таких динамічних впливів, можуть бути завдані значні пошкодження конструктивним елементам. За найгіршим сценарієм, несучі елементи можуть бути повністю зруйновані, що може призвести до обвалення частини або всієї конструкції, великої кількості жертв і значних економічних втрат. В останні десятиліття ми стали свідками великої уваги спільноти інженерів-будівельників до питань запобігання лавиноподібному руйнуванню конструкцій

[3-5]. Термін «прогресуюче руйнування» на сьогодні відомий як поширення початкового локального руйнування від одного або кількох елементів до сусідніх, що зрештою призводить до руйнування всієї конструкції або непропорційно великої її частини [6]. З моменту першого зафіксованого випадку прогресуючого обвалення 1968 р. відбулося багато трагічних обвалень будівель різного призначення та з різних причин, що змусило спеціалістів будівельної галузі звернути особливу увагу на це питання. Зокрема навіть ті, хто не причетний до будівництва, можуть пам'ятати трагічні події 2001 р. в США, коли були зруйновані будівлі Всесвітнього торговельного центру в м. Нью-Йорк (рис. 1, а) внаслідок теракту, або обвалення житлової будівлі в м. Серфсайд у 2021 р. (рис. 1, б) і багато інших. Тому розуміння механізму руйнування конструкцій і точний аналіз мають вирішальне значення для проєктування нових і модернізації існуючих конструкцій і контролю руйнування.

Сьогодні трагічний досвід руйнування багатоповерхових будівель, пізнали мешканці багатьох міст України (рис. 2).

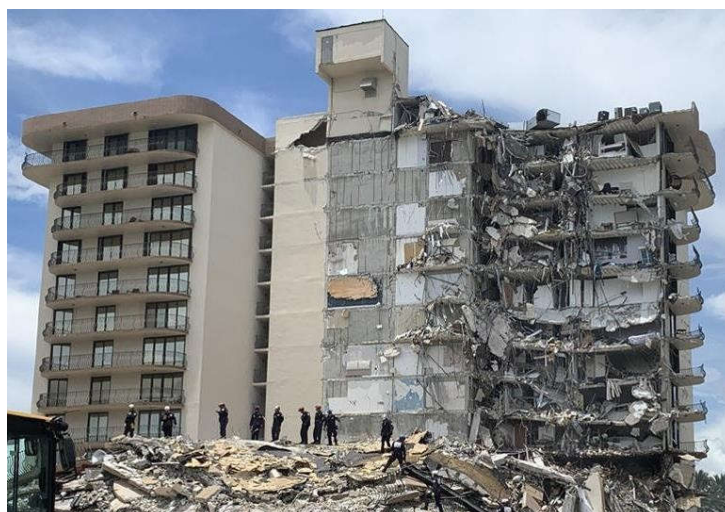
За даними голови Харківської ОВА, станом на 14 липня 2022 р. по Харківській області внаслідок бойових дій зруйновані або мають пошкодження 4232 житлових будинки, з них понад 2700 – це багатоповерхівки та багатопід'їзді багатоквартирні будинки, а також більше 500 навчальних закладів, 100 медичних установ, 97 закладів культури, 12 промислових підприємств. Внаслідок бомбардувань та обстрілів агресором зруйновано і пошкоджено більше 4800 об'єктів інфраструктури. На жаль, чим довше триває війна, тим більшою стає

цифра зруйнованих будівель. Тому питання оцінювання працездатності будівель харківської забудови та їхньої стійкості до

прогресуючого обвалення зараз стало особливо актуальним.

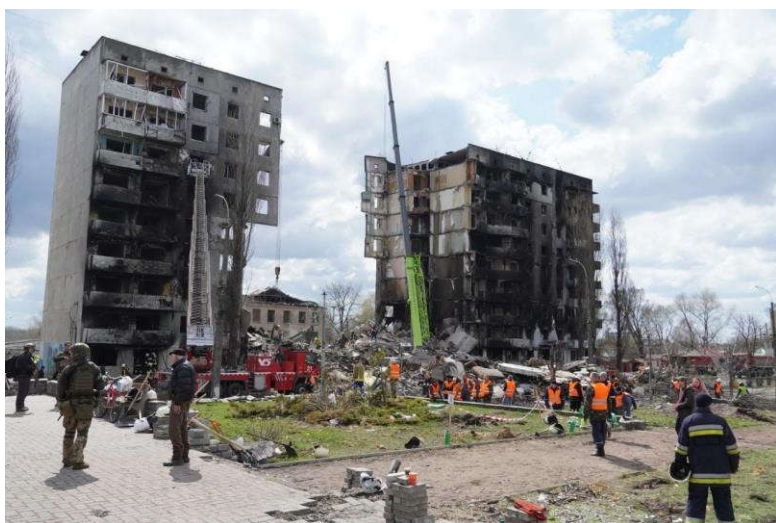


а

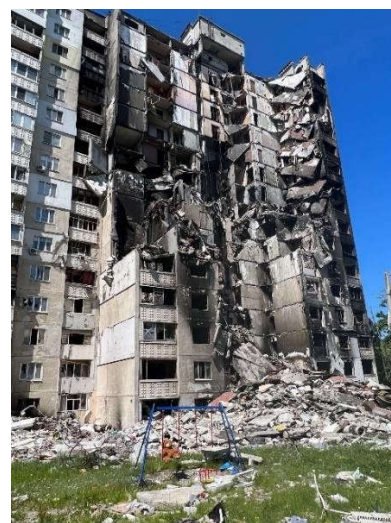


б

Рис. 1. Приклади будівель, що зазнали прогресуючого обвалення: а – Всесвітній торговельний центр (Нью-Йорк, США); б – житловий будинок (Серфсайд, США)



а



б

Рис. 2. Приклади обвалення будівель в Україні внаслідок бойових дій: а – м. Бородянка (Київська обл.), б – м. Харків

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Слід зазначити щорічне збільшення кількості публікацій [7], присвячених аналізу прогресуючого обвалення залізобетонних каркасних конструкцій (рис. 3), що відображує

зростаючий інтерес науковців до цієї проблеми. Перш за все він пояснюється зростанням очікувань користувачів в отриманні інформації про конструктивний захист об'єктів будівництва від екстремальних інцидентів.

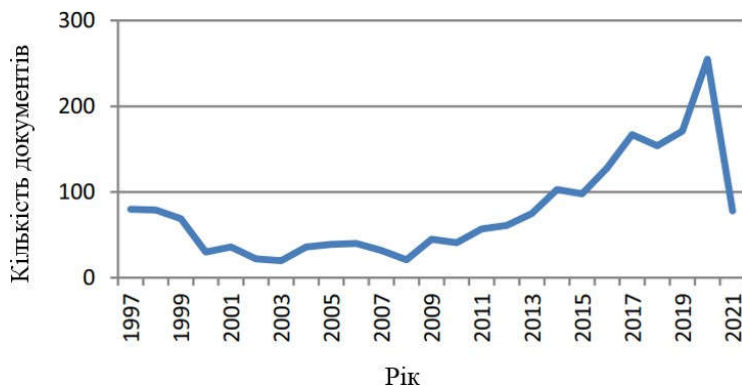


Рис. 3. Кількість статей, публікованих авторами щорічно в журналі Scopus (ELSEVIER) з питань аналізу прогресивного обвалення каркасних залізобетонних конструкцій (до 31 січня 2021 р.) [7]

Для вивчення стійкості конструкцій до прогресуючого обвалення дослідниками зазвичай застосовуються експериментальні та чисельні методи. Лабораторні дослідження в основному зосереджені на плоских рамних конструкціях [8, 9], вузлах сполучення балок з колонами [10, 11], а також масштабованих просторових залізобетонних конструкціях [12, 13]. Наприклад, американським дослідником М. Сасані було проведено низку польових випробувань для вивчення стійкості до прогресуючого обвалення за різних сценаріїв видалення колон у 2007-2011 рр. [14, 15]. За результатами випробувань, основними механізмами опору руйнуванню залізобетонних конструкцій є робота на вигин, розпір і створення додаткових ступенів передачі навантаження. З одного боку, випробування плоских рамних конструкцій або окремих вузлів сполучень не здатні репрезентувати поведінку конструктиву в цілому через його значно більшу складність. З іншого боку, результати випробування на масштабованих конструкціях часто ставляться під сумнів у зв'язку з тим, що власне закони масштабування не завжди точно витримуються. Разом з тим експериментальні натурні дослідження стійкості повномасштабних конструкцій до прогресуючого обвалення неминуче стикаються з багатьма пробле-

мами, зокрема такими, як висока вартість і надмірна складність, що перешкоджає можливості проведення дублюючих розрахунків або параметричних досліджень.

З розвитком комп'ютерних технологій та обчислювальної механіки стало можливим тестування повномасштабних конструкцій у математичній формі. Розроблено програмне забезпечення, в основу якого закладена низка чисельних методів аналізу, що може бути використано для встановлення стійкості до прогресуючого обвалення залізобетонних конструкцій, включаючи метод дискретних елементів (DEM), метод прикладних елементів (AEM) і метод скінченних елементів (FEM). Однак використання перелічених методів з детальними моделями все ще займає багато машинного часу для завершення повного розрахунку обвалення конструкції, що робить їх непридатними для варіантного аналізу або оцінювання конструктивної надійності після обвалення. Наприклад, Weidlinger Associates Inc. (WAI) у 2011 р. провела серію розрахунків на прогресуюче обвалення [16] з використанням детальних скінченно-елементних моделей для двох п'ятиповерхових будинків із залізобетонним каркасом за різними сценаріями руйнування колон, що зайняло забагато часу, навіть враховуючи залучені додаткові потужності.

Як наслідок, для аналізу на прогресуюче обвалення були широко застосовані спрощені скінченно-елементні моделі залізобетонних конструкцій з використанням рамних елементів через їхню обчислювальну ефективність. На жаль, структурна модель, що була використана в таких симуляціях, не враховує руйнування вузлів, руйнування внаслідок втрати зчеплення між арматурою і бетоном при великих деформаціях та ін. В останні роки Національний інститут стандартів і технологій (NIST) провів багато дослідницьких робіт, щоб врахувати та усунути ці особливості. Однак розглянуті в основному були сталеві конструкції [17]. Успіхи використання спрощених обчислювальних моделей для залізобетонних конструктивів є дуже обмеженими. Бао [18] запропонував використання укрупнених моделей для оцінювання прогресуючого обвалення каркасних залізобетонних конструкцій, яку пізніше було модифіковано відповідно до результатів тестувань на повномасштабних вузлах залізобетонних конструкцій [19]. Разом з тим на сьогодні все ще бракує тривимірних спрощених чисельних моделей [20], які можна було б надійно та ефективно використовувати для оцінювання поступового обвалення каркасних конструкцій.

Визначення мети та завдання дослідження. Враховуючи наведену вище інформацію стаття має на меті систематизацію конструктивних рішень будівель житлового фонду м. Харкова з позиції їхньої працездатності, а також стійкості до прогресуючого обвалення та надзвичайних впливів під час бойових дій. Мета передбачає вирішення таких завдань:

- аналіз конструктивних рішень існуючої забудови м. Харкова та систематизацію будинків за відповідними категоріями;
- виявлення в конструкціях перерахованих будинків елементів, що є найбільш схильними до ураження внаслідок динамічних впливів і, як наслідок, прогресуючого обвалення;

- надання стислих рекомендацій щодо захисту знов споруджуваних будівель з найбільш працездатною конструктивною схемою, враховуючи досвід наявних руйнувань від аварійних впливів і прогресуючого обвалення.

Основна частина дослідження. Більшість існуючих будівель житлового фонду м. Харкова умовно можна віднести, у певному сенсі, до чотирьох часових періодів:

- будинки XIX – початку XX ст. («старі місто»);
- будинки 30-х рр. XX ст. (епоха конструктивізму);
- будинки, зведені після закінчення Другої світової війни;
- сучасні будинки незалежної України.

Значна частина будівель Харкова, що збереглися і експлуатуються зараз, належать до часів «старого міста» та були збудовані наприкінці XIX – початку XX ст. Ці будівлі з цегляним остовом мають тільки вертикальні несучі стіни або стіни і цегляні або залізобетонні колони всередині. Перекриття здебільшого виконані дерев'яними. Велика кількість таких будівель зосереджена в центральній частині міста (рис. 4).

На початку XX ст. у Харкові зводяться також знакові для міста будівлі у стилі конструктивізм. Для багатьох з них впроваджується технологія індустріального залізобетону. До цих будинків належить Держпром (будинок державної промисловості) – один з перших радянських монолітних залізобетонних багатоповерхових будинків, пам'ятка архітектури у стилі конструктивізму (рис. 5). Будівля зводилася протягом 1925-1928 рр. за проектом архітекторів С. Серафімова, С. Кравця і М. Фельгера. Під керівництвом головного інженера будівництва П. Роттерта розроблена технологія індустріального залізобетону. Крім Держпрому, знаковими для міста також є будинки головного поштамту і колишній готель «Інтернаціонал» (нині «Харків») (рис. 6).



Рис. 4. Житлові будинки часів «старого міста»: а – пров. Плетнівський, 7; б – вул. Гоголя, 11



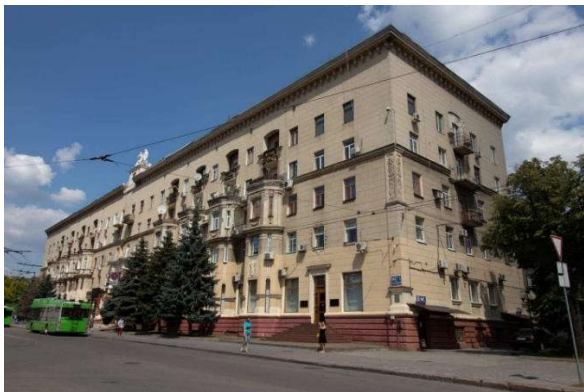
Рис. 5. Перша монолітна будівля Харкова – будинок Держпрому



Рис. 6. Готель «Інтернаціонал» (а) і головний поштамт (б)

Після закінчення Другої світової війни у Харкові розпочинається активне будівництво. У цей період зводиться більшість існуючих до цього дня «сталінок» – узагальнена розмовна назва багатоквартирних цегляних будинків, побудованих у період з 1933 по 1961 рр. по

всій території колишнього СРСР (рис. 7). Також у цей період місто почало забудовуватися за типовими проектами житлового будівництва. Так, до 1955 р. квартали Харкова забудовувалися переважно малоповерховими будинками за київською серією 1-406.



а



б

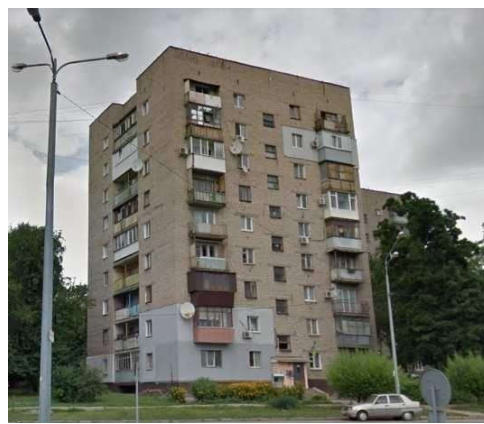
Рис. 7. Будинки, що іменуються «сталінками»: а – вул. Університетська, 9; б – вул. Мироносицька, 17

У 1955 р. в СРСР виходить постанова «Про усунення надмірностей у проектуванні та будівництві». Результатом цієї постанови стало радикальне зменшення житлової та загальної площі квартир, пов'язане з початком масовогопосімейного заселення, а також зникнення з фасадів будинків різних прикрас. Такі будинки стали називатися «хрущовками». «Хрущовки» – типові панельні або цегляні житлові будинки,

зазвичай п'ятиповерхові, з малогабаритними квартирами. Багато вулиць Харкова забудовано п'ятиповерхівками серій 1-438, 1-447С, 1-464, 1-468 і їхніх варіацій (рис. 8, а). У середині 1960-х рр. з'явилися перші типові дев'ятиповерхові будинки Харкова, що належали до серій 1-447С та 1у-438А, які в ідеологічному плані також можна віднести до «хрущовок» (рис. 8, б).



а

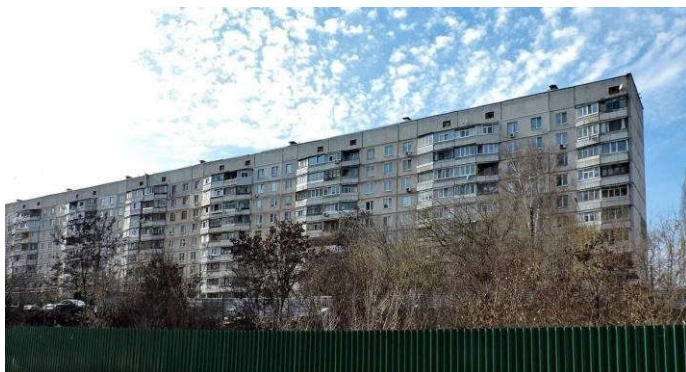


б

Рис. 8. Харківські «хрущовки»: а – житловий будинок по вул. Єсеніна 3, серія 1-438-5; б – вул. Світла 2, серія 1-447С

Після прийняття на початку 1970-х рр. «Єдиного каталогу будівельних деталей», на основі якого розроблялися всі подальші нові типові проекти, Харківський ДБК № 1 розпочав виробництво панелей московської серії П-57 ЮА (рис. 9, а) і розроблених у «Харківпроекті» будинків серій 1-468А-55,

59. Будинками цих двох типових серій забудовано багато районів міста, вони є одними з найпоширеніших типових будівель. Паралельно з цим, починаючи з середини 1970-х рр., «Житлобуд-1» розпочинає будівництво дув'ятиповерхових цегляних будинків за серією 87 (рис. 9, б).



а



б

Рис. 9. Житлові будинки серії:
а – П-57 ЮА по вул. Балакірева, 20; б – серія 87 по Салтівському шосе, 248, а

На початку 1980-х рр. ДБК № 1 переходить із застарілих серій П-57 ЮА та 1-468А-55, 59 на більш сучасні серії: дев'ятиповерхову серію 163 (рис. 10, а) та шістнадцятиповерхову 162 (рис. 10, б), які отримали Державну премію УРСР у галузі архітектури. Компанія «Житлобуд-1» буде чотирнадцятиповерхові будинки за типовим проектом серії 87 – 124-87-107.

Після розпаду СРСР ДБК № 1, який планував перейти до нової серії панельних будинків 176, перестає існувати, як і здебільшого все типовежитлове будівництво в Харкові. За винятком Курязького ДБК, який до кінця 2000-х продовжував зводити будинки серії 182 у м. Пісочині і м. Харкові. Багато будівель «Житлобуд-1», побудовані в цей період, також були поліпшеною версією цегляної серії 87.



а

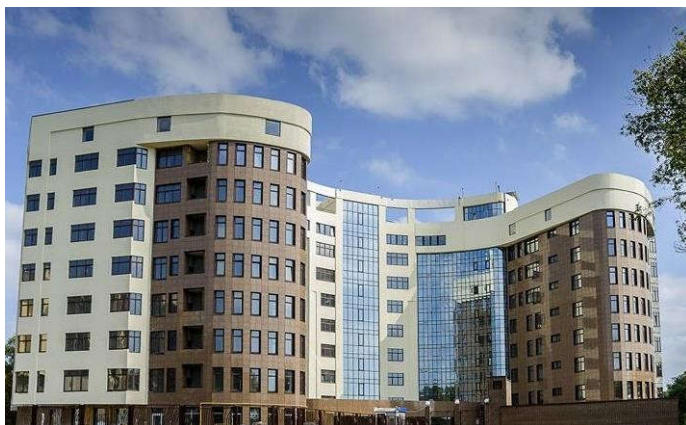


б

Рис. 10. Крупнопанельні житлові будинки:
а – 163 серії (вул. Матюшенко, 3, а); б – 162 серії (вул. Танкопія, 7)

Сучасні житлові будинки та офісні будівлі почали зводити за індивідуальними проектами, що являють собою цегляні будівлі заввишки до 16 поверхів або монолітні залізобетонні каркасні будівлі висотою до 25 поверхів (рис. 11, а). Якщо на початку багато цегляних будинків являли собою перероблену версію серії 87, то з

часом застосування знайшли багатопустотні плити прогоном 12.0 м, а з розвитком у Харкові виробництва попередньо-напружених залізобетонних конструкцій безопалубного формування, архітектура таких будівель стала значно відрізнятися від типових серійних проектів (рис. 11, б).



а



б

Рис. 11. Сучасні монолітні будинки (а – ЖК «Фаворит») і цегляні (б – ЖК по просп. Героїв Харкова, 64, а)

За своїм конструктивним рішенням, серед охарактеризованої житлової забудови м. Харкова можна виділити три групи найпоширеніших типів житлових будівель (рис. 12).

Аналіз пошкоджень будівель та рекомендації щодо можливого відновлення та будівництва нових будівель. Післявоєнному відновленню та зведенню нових будівель мають передувати всебічне обстеження пошкоджень, вивчення досвіду інших країн і внесення змін до існуючих нормативних документів. У кожному окремому випадку рішення про доцільність відновлення або його неможливість має прийматися окремо залежно від завданих збитків і/або складності робіт. Звісно, усі історичні будівлі мають бути реабілітовані, оскільки вони формують унікальний вигляд нашого міста.

Що стосується досвіду з відновлення будинків після вибухових впливів, у Харкові у 2012 р. було отримано позитивний досвід відновлення будівлі після вибуху природного газу в шістнадцятиповерховому панельному будинку за адресою просп. Героїв Харкова, 248, г (рис. 13). Тоді було розроблено робочий проект капітального ремонту будівлі, який передбачав заміну зруйнованих конструкцій із збереженням об'ємно-планувальних рішень відповідно до типового проекту серії 162. Будівельні роботи мали забезпечити відновлення ресурсу жорсткості та міцності будівлі. У рамках цих робіт було передбачено часткову заміну стінових панелей на каркасні полегшені конструкції, заміну зруйнованих збірних панелей перекриття на нові монолітні плити (9-11 поверхи), а також посилення існуючих панелей перекриття і внутрішніх несучих стінових панелей.



Рис. 12. Основні конструктивні рішення житлової забудови м. Харкова



Рис. 13. Наслідки вибуху природного газу в шістнадцятиповерховому панельному будинку (а) і загальний вигляд відновленого фасаду (б)

Однак у реаліях, що склалися, коли сотні панельних будівель зазнали руйнувань і з ладу виведено велику кількість несучих панелей, з урахуванням відсутності на сьогодні підприємств, які випускають ці

панелі, відновлення таких будівель є досить складним завданням. Ця обставина вимагає розроблення нових прогресивних рішень без або з урахуванням повного демонтажу споруди.

У поточних умовах бойових дій поки що неможливо провести всебічний аналіз із виявленням усіх пошкоджень і руйнувань. Навіть після закінчення війни процес встановлення конкретних пошкоджень і прийняття рішення про знесення чи відновлення будівель займе час. Жодна житлова будівля в Харкові, яка зазнала обстрілів, не розрахована на можливість опору таким засобам ураження. На Харків скидалися бомби вагою 500 кг і крилаті ракети з бойовою частиною в межах 400 кг.

Далеко не кожна фортифікаційна споруда здатна витримати такі масовані та тривалі обстріли, не кажучи вже про житлові будинки. Зокрема й існуючі європейські рекомендації щодо розрахунку несучих конструкцій на вибухові впливи «Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components» [20] розглядають як основний тип впливу – зовнішній вибух, а не прямий обстріл чи бомбардування житлових будівель (рис. 14).

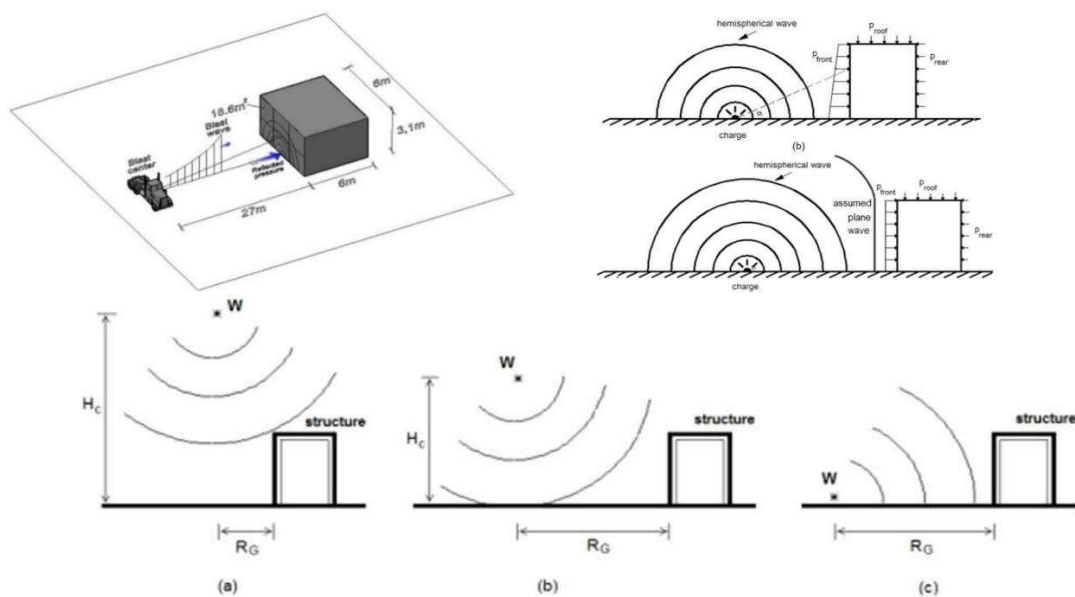


Рис. 14. Різні сценарії навантаження від зовнішніх вибухів

Не можна виділити якийсь один тип будівель з перерахованих вище і стверджувати, що він був схильний до руйнувань менше або більше. Наприклад, старі цегляні будинки («сталінки») мають значну, за сучасними мірками, товщину стін (не менше 640 мм), однак при цьому перекриття в них переважно дерев'яні. Такі перекриття не утворюють єдиного жорсткого диску, здатного перерозподіляти навантаження і не можуть чинити опір від проникного впливу зосереджених навантажень при вибухах. Крім того, такі перекриття є горючими, що також зменшує працездатність будівель у разі влучання

об'єктів ураження, наприклад через покрівлю та подальшу пожежу всередині.

Більш сучасні цегляні будинки з перекриттями з пустотних попередньо-напружених залізобетонних плит часто об'єднані в єдині диски. Просторова жорсткість у всіх типів цегляних будівель є значною, що забезпечується за рахунок великої кількості вертикальних несучих стін. Тим не менш, при локальному пошкодженні опорної зони плити можливе обвалення однієї або кількох плит перекриттів. Крім того, товщина зовнішніх стін у таких будинках може зменшуватися до 380 мм, що є недостатнім при прямому

влучанні засобів ураження. На сьогодні відомі випадки руйнування стін товщиною 510 мм від безпосереднього влучання снаряду.

Ще більшу просторову жорсткість мають панельні будівлі, де, окрім зовнішніх, усі внутрішні панелі також є несучими. Конструктивним місцем панельних будівель, що мають найбільшу схильність до руйнування при різних впливах, є вузли сполучення панелей. При недостатній жорсткості стиків можливе обвалення значної частини або всієї будівлі. Саме такий вид руйнування конструкцій у будівельній науці і отримав назву прогресуючого обвалення.

Разом з тим, на відміну від інших типів розглянутих будівель, можна відзначити, що монолітні каркасні будинки, імовірно, здатні забезпечити більшу стійкість, у тому числі і до прогресуючого обвалення, ніж решта перелічених споруд. Зокрема через наявність більш надійного з'єднання вертикальних елементів каркасу з горизонтальними дисками перекриттів значно більший ступінь статичної невизначеності та більшу просторову жорсткість порівняно з іншими типами будівель. Якщо ж говорити, власне, про вплив від вибухової хвилі, то люди в цих спорудах все ж таки не до кінця перебувають у повній безпеці, адже стіни таких будівель є ненесучими та часто виконані з дрібнорозмірних блоків малої щільності або взагалі мають велику площу скління, що є приводом для використання надійних укриттів – надземних чи підземних.

При проектуванні будинків в Україні вимога забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення є обов'язковою тільки для будівель класу наслідків (відповідальності) ССЗ, за ДБН В.1.2-14:2018 [2]. Будинки, запроектовані відповідно до цих вимог, при раптовому видаленні одного або декількох вертикальних несучих елементів, мають зберегти цілісність або щонайменше не допустити обвалення конструкцій понад встановлену їхню кількість. Проте нормативні документи з докладними

методиками та вимогами ще не до кінця введені в дію в нашій країні. Запропоновані методики піддаються критиці. Наприклад, при потрапленні снаряду варто враховувати не тільки вихід з ладу якогось одного вертикального елемента конструкції, але й додаткові дії вибухової хвилі та можливість виникнення пожежі.

Якщо говорити про забезпечення стійкості багатоповерхових будівель із залізобетонним каркасом до прогресуючого обвалення, слід вживати такі конструктивні заходи [22]:

- забезпечити безперерізність перекриттів і безперервність армування конструкцій як у плані, так і по висоті;
- підсилювати (за необхідності) сусідні вертикальні несучі конструкції, які можуть сприймати навантаження від елемента, що зазнав руйнування;
- застосовувати подвійне безперервне армування верхньої та нижньої зон перекриттів. При цьому загальна площа арматури в обох напрямках має бути не менше 0,25 % площі перерізу бетону;
- надійно стикувати та анкерувати арматуру у відповідальних вузлах – на стику з'єднання стін, колон і перекриттів.

Розрахунок будівель слід виконувати за просторовою триединою схемою «основа – фундамент – споруда», використовуючи при цьому сучасні програмні комплекси, що враховують фізичну та геометричну нелінійності, а також забезпечують високу точність результатів розрахунків і можливість економії матеріалів.

Виконувати розрахунок доцільно за такою схемою:

- спочатку виконується розрахунок будівлі на постійні й тимчасові навантаження, включені до аварійного сполучення, у фізично нелінійній постановці;
- напружено-деформований стан, отриманий на попередньому етапі, зазначається стартовим для подальшого розрахунку на дію навантажень від тих елементів, що були вилучені в результаті руйнування;

- проводиться розрахунок на додаткове навантаження від вилучених елементів у фізично та геометрично нелінійних постановках. Навантаження, що виникає від вилучення зруйнованих елементів, має відповідати зусиллям, що були отримані в цих елементах на попередньому етапі розрахунку з урахуванням збільшення на коефіцієнт динамічності 1,2. Далі виконується перевірка елементів, що залишилися, за несучою здатністю без урахування поздовжнього вигину.

Додатково слід зазначити, що на сьогодні ефективним та апробованим [23] методом аналізу конструкцій на прогресуюче обвалення є енергетичний метод з побудовою енергетичного портрета. Алгоритм цього методу можна подати як такі процедури:

- побудова полів граничної щільності енергії деформації в елементах конструктиву з урахуванням фізичної та/або геометричної нелінійності [24];

- відбір елементів з максимальними значеннями граничної щільності на основі аналізу отриманих полів на попередньому кроці;

- призначення обраних елементів як «відповідальних» [22];

- проведення розрахунків за локальними розрахунковими схемами з урахуванням усунення з них «відповідальних» елементів;

- міцнісний аналіз отриманих результатів (розрахунок за групою I граничних станів); збільшенням перерізів арматури та класу бетону (за необхідності).

Що ж стосується конструктивних заходів гарантування безпеки людей у монолітних будинках, то слід звернути увагу на досвід Ізраїлю, де у всіх сучасних будівлях, за їхнім законодавством, обов'язкове будівництво захищених кімнат Мерхав Муган (букв. захищений простір), відомий як маммад. Мерхав Муган вважається альтернативою бомбосховищу, адже в умовах обмеженості часу до них можна швидше дістатися, аніж до спеціального бомбосховища, що може бути розташоване на деякій відстані. Маммад забезпечує захист від різних типів снарядів і хімічної зброї.

Конструкція маммадів може бути різною (рис. 15, а). Але, як правило, це приміщення обмежене монолітними залізобетонними стінами товщиною не менше 300 мм і вікном, захищеним сталевим листом завтовшки 30-50 мм, яке автоматично зачиняється за сигналом тривоги. Маммади обладнані незалежною системою вентиляції, фільтрації повітря та системами оповіщення. На жаль, навіть такі потужні споруди не замінюють бомбосховищам (рис. 15, б), але в нових реаліях будівництво таких приміщень у будинках може стати постійною практикою.



а



б

Рис. 15. Будівництво маммаду в Ізраїлі (а) і його натурне випробування (б)

Висновки. Житловий фонд м. Харкова дуже різноманітний і включає будівлі різних років будівництва, де застосовувалися різні конструктивні схеми, матеріали та рішення. Зокрема виділено, що за часом зведення житлові будинки можна розділити на чотири групи, а за конструктивним рішеннями – на три: цегляні, збірні великопанельні та монолітні залізобетонні. Аналізуючи руйнування будівель м. Харкова і їхній конструктив, слід зазначити, що в цегляних будівлях періоду «старого міста» найбільш ненадійними є плити перекриттів, виконані переважно дерев'яними, у сучасних цегляних будинках – це несучі стіни недостатньої товщини та зона обпирання збірних плит перекриттів на зовнішні стіни, у панельних будинках – вузли стикування несучих панелей. Крім того, можна зробити висновок, що монолітні залізобетонні будівлі найбільше здатні до супротиву впливам подібного роду, гарантуючи в більшості випадків цілісність несучого остову, але не огорожувальних конструкцій. Окрім

обов'язкового розрахунку на прогресуюче обвалення монолітних залізобетонних будинків, зокрема з використанням наведених вище алгоритмів на базі енергетичного методу, при просуванні слід звертати особливу увагу на відповідальні вузли сполучення несучих елементів, враховувати дію ударної хвилі, передбачати надійне підземне укриття, обладнане сучасними інженерними системами, або спеціальні захищені кімнати в межах кожного житлового поверху (за типом маммадів), здатні вберегти життя якнайбільшої кількості людей.

Після перемоги України над російськими окупантами на Харків та інші міста України чекає велика робота з відновлення та модернізації міст. При розробленні проєктів відбудови наголошено на створенні та доступності бомбосховищ, укріплених паркінгів і сучасних укриттів для закладів соціальної сфери, які дозволять гарантувати людям безпеку при повітряній тривозі, та інші рекомендації, перелічені вище.

Список використаних джерел

1. ДБН В.2.2-41:2019. Висотні будівлі. Основні положення. Чинний від 01.01.2020. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/v_2_2_41/1-1-0-1855 (дата звернення: 31.07.2022).
2. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Чинний від 01.01.2019. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn_v_1_2_14/1-1-0-1826 (дата звернення: 31.07.2022).
3. Alashker Y., Li H., El-Tawil S. Approximations in progressive collapse modeling. *Journal of Structural Engineering*. 137(9). 2011. P. 914–924. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000452](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000452) (last access: 31.07.2022).
4. El-Tawil S., Li H., Kunnath S. Computational simulation of gravity-induced progressive collapse of steel-frame buildings: current trends and future research needs. *Journal of Structural Engineering*. 140(8). 2013. A2513001112. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000897](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000897) (last access: 31.07.2022).
5. Iribarren B. S., Berke P., Bouillard P., et al. Investigation of the influence of design and material parameters in the progressive collapse analysis of RC structures. *Engineering Structures*. 33(10). 2011. P. 2805–2820. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.06.005> (last access: 31.07.2022).
6. Ellingwood B. R. Mitigating risk from abnormal loads and progressive collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 20(4). 2006. P. 315–323. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2006\)20:4\(315\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2006)20:4(315)) (last access: 31.07.2022).

7. Pawan Kumar, Samrat Lavendra and T. Raghavendra. A Review on the Progressive Collapse Analysis of Reinforced Concrete Frame Structures. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 822. 2021. 012003. DOI:10.1088/1755-1315/822/1/012003 (last access: 31.07.2022).
8. Orton S. L., Kirby J. E. Dynamic response of a RC frame under column removal. Journal of Performance of Constructed Facilities. 28(4). 2013. 04014010. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000464](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000464) (last access: 31.07.2022).
9. Stinger S. M., Orton S. L. Experimental evaluation of disproportionate collapse resistance in reinforced concrete frames. ACI Structural Journal. 110(3). 2013. P. 521-529. DOI:10.14359/51685609 (last access: 31.07.2022).
10. Yu J., Tan K. H. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages. Engineering Structures. 55. 2013. P. 90–106. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.08.040> (last access: 31.07.2022).
11. Qian K., Li B. Performance of three-dimensional reinforced concrete beam-column substructures under loss of a corner column scenario. Journal of Structural Engineering. 139(4). 2012. P. 584–594. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000630](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000630) (last access: 31.07.2022).
12. Kokot S., Anthoine A., Negro P., et al. Static and dynamic analysis of a reinforced concrete flat slab frame building for progressive collapse. Engineering Structures. 40. 2012. P. 205–217. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.02.026> (last access: 31.07.2022).
13. Xiao Y., Kunnath S., Li F. W., et al. Collapse test of three-story half-scale reinforced concrete frame building. ACI Structural Journal. 112(4). 2015. P. 429–438. DOI:10.14359/51687746 (last access: 31.07.2022).
14. Sasani M., Kazemi A., Sagiroglu S., et al. Progressive collapse resistance of an actual 11-story structure subjected to severe initial damage. Journal of Structural Engineering. 137(9). 2011. P. 893–902. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000418 (last access: 31.07.2022).
15. Sasani M., Bazan M., Sagiroglu S. Experimental and analytical progressive collapse evaluation of actual reinforced concrete structure. ACI Structural Journal. 104(6). 2007. P. 731–739.
16. Department of Homeland Security. Preventing Structures from Collapsing. Washington, DC. 2011. Department of Homeland Security. 196 p.
17. Main J. A., Sadek F. Modeling and analysis of single-plate shear connections under column loss. Journal of Structural Engineering. 140(3). 2013. 04013070. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000866](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000866) (last access: 31.07.2022).
18. Bao Y., Kunnath S.K., El-Tawil S., et al. Macromodel-based simulation of progressive collapse. RC frame structures. Journal of Structural Engineering 134(7). 2008. P. 1079–1091. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:7\(1070\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:7(1070)) (last access: 31.07.2022).
19. Lew H.S., Bao Y., Sadek F., et al. An experimental and computational study of reinforced concrete assemblies under a column removal scenario. 10.6028/NIST.TN.1720. 2011. 106 p. DOI:10.6028/NIST.TN.1720 (last access: 31.07.2022).
20. Zhong-Xian Li, Bo Zhong, Yanchao Shi, Yang Ding, Yifei Hao. A computationally efficient numerical model for progressive collapse analysis of reinforced concrete structures. International Journal of Protective Structures. Vol. 10, Is. 3. 2019. P. 330-358. URL: <https://doi.org/10.1177/2041419619854768> (last access: 31.07.2022).
21. Karlos V., Viaccoz B., Solomos G. Calculation of blast loads for application to structural components. Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen. 2013. 58 p. DOI:10.1016/j.compstruct.2019.111039 (last access: 31.07.2022).
22. Практичний розрахунок елементів залізобетонних конструкцій за ДБН В.2.6-98:20009 у порівнянні з розрахунками за СНиП 2.03.01-84* і EN 1992-1-1 (Eurocode 2) /

В. М. Бабаєв, А. М. Бамбура, О. М. Пустовойтова та ін.; за заг. ред. В. С. Шмуклера. Харків: Золоті сторінки, 2015. 208 с.

23. Шмуклер В. С., Резнік П. А., Альмохамад М. Про одну можливість оцінювання прогресуючого обвалення. Конструкцій при пожежі. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2020. Вип. 194. С. 37-48. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.191.2020.217291> (дата звернення: 31.07.2022).

24. Шмуклер В. С., Климов Ю. А., Бурак Н. П. Каркасные системы облегченного типа. Харков: Золотые страницы, 2008. 336 с.

Резнік Петро Аркадійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0003-3937-6833. E-mail: engipr@gmail.com.

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

Тенесеску Владислав Віталійович, аспірант кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-4935-4454. E-mail: mrtenesesku@gmail.com.

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

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.

Vladyslav Tenesesku, postgraduate student, Building Structures department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0002-4935-4454. E-mail: mrtenesesku@gmail.com.

Статтю прийнято 16.08.2022 р.