



Doi: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-4-2023-3>

УДК 624.012



БАРАБАШ М.С.

Доктор техн. наук, професор, професор кафедри комп'ютерних технологій будівництва та реконструкції аеропортів Національного авіаційного університету, Директор ТОВ «ЛІРА САПР», м. Київ, Україна, e-mail: bmari.lira@gmail.com, тел.: +38 (095) 286-39-90, ORCID: 0000-0003-2157-521X



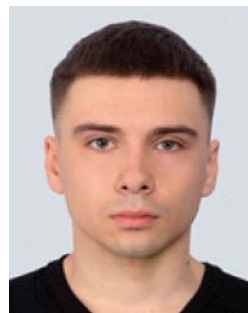
КОСТИРА Н.О.

Канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних технологій будівництва та реконструкції аеропортів Національного авіаційного університету, м. Київ, Україна, e-mail: nataliia.kostyra@npp.nau.edu.ua, тел. +38 (050) 357-45-52, ORCID: 0000-0001-5934-9563



МАКСИМЕНКО В.П.

Канд. техн. наук, с.н.с., завідувач лабораторією висотного і експериментального будівництва ДП «Науково-дослідний інститут будівельного виробництва», м. Київ, Україна, e-mail: valeriy.max@gmail.com, тел.: +38 (067) 501-33-42, ORCID: 0000-0002-2835-026X



БАРМІН І.В.

Аспірант кафедри комп'ютерних технологій будівництва та реконструкції аеропортів Національного авіаційного університету, м. Київ, Україна, e-mail: barmin499@gmail.com, тел.: +38 (099) 064-54-11, ORCID: 0009-0009-2610-3271

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ВИБУХОВОГО ТИПУ В ЗАДАЧАХ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ПК ЛІРА-САПР

АНОТАЦІЯ

У зв'язку із активними бойовими діями на території нашої країни кількість будівель та інженерних споруд, що зазнають впливу вибухових хвиль, кожного дня суттєво збільшується. Дослідження конструктивної безпеки та живучості несучих залізобетонних конструкцій при таких впливах є важливою задачею, особливо для об'єктів критичної інфраструктури.

Стаття присвячена аналізу критичних навантажень, які з'являються при вибуху, та аналізу ударних хвиль і характеру їх розповсюдження та впливу на будівлі. Розглядаються деякі пропозиції запобігання прогресуючому руйнуванню внаслідок влучання ракети. В тому числі пропонуються заходи підвищення живучості будівлі при можливому влучанні ракети.

У воєнний час стає необхідним розраховувати громадські та промислові будівлі на дію ударних хвиль при вибухах. Вибухові впливи можуть спричинити часткове, значне або повне руйнування будівель. Розраховувати несучі конструкції будівель таким чином, щоб вони гарантовано витримували дію всіх вірогідних загроз, неможливо, через їх невизначеність. Проте, можливо дослідити різні способи посилення надійності несучих конструкцій будівлі, щоб локальне руйнування не призводило до прогресуючого руйнування (або втрати стійкості).

В статті розглянуті різні види точкових вибухів – повітряний та наземний. Наведена схема утворення хвиль під час повітряного вибуху та характерна хвильова картина при наземному вибу-



ху. Проаналізовано розповсюдження хвиль при наземному вибуху. Наведена математична модель визначення параметрів ударної хвилі. Надано приклад розрахунку конструкції будівлі захисної споруди на вибухову хвилю у ПК LIRA-SAPR при дії поверхневого вибухового впливу. Приведені результати нелінійного розрахунку плити покриття на стійкість до обвалення при аварійному ударному впливі на площі до 80 м². Для моделювання нелінійного процесу навантажень використані фізично-нелінійні 4-х вузлові СЕ № 244 та 3-х вузлові СЕ № 242 при шаговому процесі навантаження, реалізованому в ПК LIRA-SAPR.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: аварійний вибуховий вплив, живучість, стійкість, прогресуюче обвалення, LIRA-SAPR, нелінійний розрахунок, метод скінченних елементів, критичні навантаження, тріщиностійкість, пластичні шарніри, перерозподіл зусиль.

SIMULATION OF DYNAMIC EXPLOSIVE TYPE LOADS IN RESEARCH OF STRUCTURAL STRENGTH USING LIRA-SAPR SOFTWARE

ABSTRACT

Due to active hostilities on the territory of our country, the number of buildings and engineering structures experiencing the influence of blast waves increases significantly every day. Studying the structural safety and survivability of load-bearing reinforced concrete structures under influence is an important task, especially for critical infrastructure facilities.

The article is devoted to the analysis of critical loads that appear during an explosion and the analysis of shock waves and the nature of their distribution and impact on buildings. Some solutions for preventing collapse failure as a result of a missile hit are considered. In particular, measures are proposed to enhance the survivability of the building in the case of a possible missile hit.

During the war, it becomes necessary to design public and industrial buildings for the impact of shock waves during explosions. Explosive effects can lead to partial, significant or complete destruction of buildings. It is impossible to calculate the load-bearing structures of buildings in such a way that they are guaranteed to withstand all possible threats due to their uncertainty. However, it is possible to explore various ways to enhance the reliability of the building's load-bearing structures so that local failure does not lead to progressive failure (or loss of strength).

The article reviews different types of point explosions - air and ground. The scheme of wave formation during an air explosion and a characteristic wave pattern during a ground explosion are presented. Wave distribution during a ground explosion is analyzed. A mathematical model for determining the shock wave parameters is presented. An example of

calculating the structure of a building of a protective structure for a blast wave in the LIRA-SAPR software under the action of a surface blast is given. There are results of the nonlinear calculation of the roof slab on resistance to failure under emergency explosive impact on the area of up to 80 m². For modeling the nonlinear loading process, physically nonlinear 4-node FE No. 244 and 3-node FE No. 242 were used with a step-by-step loading process implemented in the LIRA-SAPR software complex.

KEYWORDS: emergency explosive impact, survivability, stability, collapse failure, LIRA-SAPR, nonlinear calculation, finite element method, critical loads, crack resistance, plastic joints, force redistribution

ВСТУП

У зв'язку із активними бойовими діями на території нашої країни кількість будівель та інженерних споруд, що зазнають впливу вибухових хвиль, кожного дня суттєво збільшується. Дослідження конструктивної безпеки та живучості несучих залізобетонних конструкцій при таких впливах є важливою задачею, особливо для об'єктів критичної інфраструктури.

Вибух є короткочасним процесом перетворення речовини з виділенням великої кількості енергії в невеликому обсязі. При вибуху в атмосфері виникають повітряні ударні хвилі, що поширюються у вигляді області стиснення-розрідження на своєму фронті тиску, температури, щільності та швидкості частинок середовища (масової швидкості). При вибухах компактного заряду вибухової речовини (ВР) довільної форми на відстанях, що перевищують декілька його характерних розмірів, ефективність дії ударної хвилі еквівалентна дії заряду сферичної форми. Форма фронту хвилі також є сферичною. Таким чином, форма заряду несуттєво позначається на параметрах повітряної ударної хвилі на відстанях, що становлять практичний інтерес. Крім того, маса заряду ВР на цих відстанях виявляється несуттєвою в порівнянні з масою сферичного обсягу повітря (за фронтом ударної хвилі), що залучається до руху. Ці обставини призводять до певної абстракції, що полегшує постановку та вирішення завдання щодо розрахунку параметрів ударних хвиль – схеми «точкового вибуху».

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

У воєнний час стає необхідним розраховувати громадські та промислові будівлі на дію ударних хвиль при вибухах. Вибухові впливи можуть спричинити часткове, значне або повне руйнування будівель. Розраховувати несучі конструкції будівель таким чином, щоб вони гарантовано витримували дію всіх вірогідних загроз, немож-



ливо, через їх невизначеність. Проте, можливо дослідити різні способи посилення надійності несучих конструкцій будівлі, щоб локальне руйнування не призводило до прогресуючого руйнування (або втрати стійкості).

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Питанням розробки методів запобігання прогресуючого обвалення присвячені праці В.О. Алмазова [1], А.Н. Бирбраера [2], М.С. Барабаш, А.С. Городецького, В.П. Максименко, [3 - 7], Немчинова Ю.І. [8, 9], Б.С. Расторгуєва [10], К.Н. Мутки, зарубіжних вчених G. Powell [11], J.R. Gilmour та K.S. Viridi [12], G. Kaewkulchai і E.V. Williamson та A.J. Pretlove [13], M. Ramsden та A.G. Atkins [14], B.A. Izzudin, A.G. Vlassis, A.Y. Elghazouli, D.A. Nethercot [15] та інших. У працях показаний вплив динамічного ефекту під час прогресуючого обвалення, яке зменшується при збільшенні пластичних деформацій.

У статті вчених A.J. Pretlove, M. Ramsden та A.G. Atkins [14] поставлена задача про необхідність врахування динамічного перерозподілу зусиль під час розрахунку на прогресуюче обвалення. Автори доводять неточність статичного розрахунку та його непридатність для запобігання прогресуючого руйнування. G. Kaewkulchai та E.V. Williamson [13] на прикладних задачах доводять необхідність врахування динамічних ефектів. J.R. Gilmour та K.S. Viridi [12] для аналізу обвалення плоскої залізобетонної рами використовували тривимірний квазістатичний нелінійний елемент. Б.С. Расторгуєв [10] запропонував методи забезпечення живучості будівлі на основі динамічного розрахунку конструкції багатопверхового плоского каркасу при видаленні колони деякого поверху в двох випадках: прогресуюче обвалення частини будівлі та втрата загальної стійкості будівлі.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

В статті розглянемо різні види точкових

вибухів, а саме такі як повітряний та наземний. Задача впливу на несучі конструкції точкового вибуху з урахуванням протитиску постає, коли вибух відбувається на певній відстані від об'єкту і тиск вибухової хвилі можна порівняти з атмосферним тиском. Така задача може бути вирішена лише чисельними методами в програмних модулях сучасних САПР. Задачу про точковий вибух формують для трьох видів симетрії: сферичної, циліндричної та плоскої. Циліндрична симетрія відноситься до зарядів, розподілених уздовж прямої, а плоска – до зарядів, розташованих у певній площині. Ефект дії ударних хвиль залежить як від виду симетрії, так і від розташування точки (лінії, площини) вибуху щодо земної поверхні. При повітряному вибуху ударна сферична хвиля досягає земної поверхні та відбивається від неї (рис. 1). На деякій відстані від епіцентру вибуху (проекції центру вибуху на земну поверхню) фронт відбитої хвилі збігається з фронтом падаючої, внаслідок чого утворюється головна хвиля з вертикальним фронтом, що поширюється від епіцентру вздовж земної поверхні. Близня зона, де відсутнє злиття фронтів, називається зоною регулярного відбиття, а дальня зона, у якій поширюється головна хвиля, – зоною нерегулярного відбиття (нижче траєкторії потрійної точки злиття трьох фронтів). У ближній зоні при помірній висоті вибуху тиск в ударній хвилі дуже великий. Тому найбільший інтерес становлять дані про ударну хвилю в дальній зоні.

Характер повітряної ударної хвилі при наземному вибуху (за межами вирви) відповідає дальній зоні повітряного вибуху. Таким чином, як при повітряному, так і наземному вибухах зазвичай розглядають повітряну ударну хвилю, що поширюється від епіцентру з вертикальним фронтом. Характерна хвильова картина при наземному вибуху наведена на рис. 1.б. У двошаровому ґрунтовому масиві енергія вибуху, передана ґрунту, викликає пряму вибухову хвилю 1.

Повітряна ударна хвиля В, що поширюється

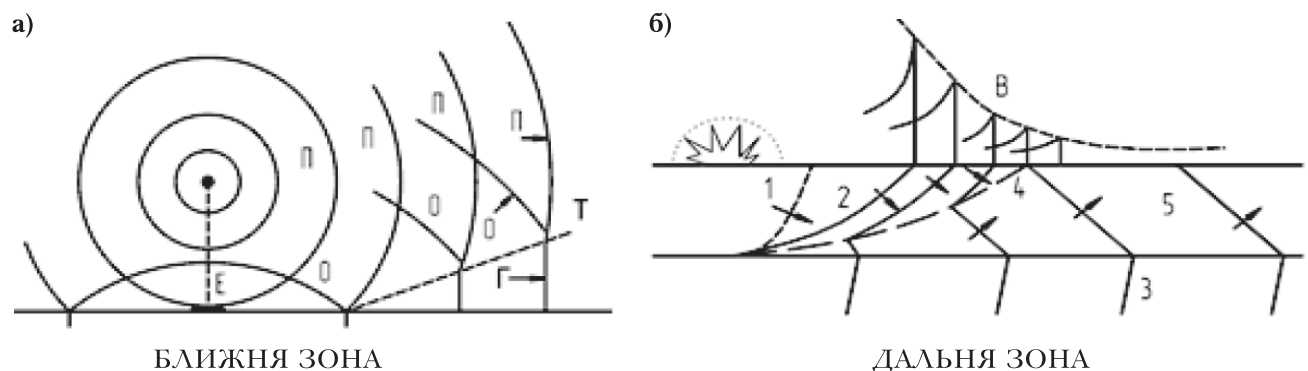


Рисунок 1 – а – Схема утворення хвиль під час повітряного вибуху: Е – епіцентр вибуху; П – фронт падаючої хвилі; 0 – фронт відбитої хвилі; Г – фронт головної ударної хвилі; Т – траєкторія потрійної точки. б – Розповсюдження хвиль при наземному вибуху: 1 – пряма вибухова хвиля; 2 – хвиля стиснення; 3 – заломлена хвиля; 4 – траєкторія вибухової хвилі; 5 – випереджальний режим



вздовж поверхні ґрунту, сповільнюється, а її інтенсивність зменшується, що викликає в м'якому шарі хвилю стиснення, режим якої 2 на траєкторії 4 переходить в випереджальний режим 5. Крім того, утворюється заломлена хвиля 3. При досить потужному м'якому ґрунтовому шарі нахил хвилі стиснення дуже малий, тоді її фронт майже паралельний поверхні ґрунту.

З моменту приходу фронту повітряної ударної хвилі в точку на земній поверхні тиск різко підвищується до максимального значення P_ϕ (рис. 2), а потім зменшується до атмосферного P_0 і нижче атмосферного. Період τ_+ підвищеного надлишкового (понад атмосферного) тиску $\Delta P = P - P_0 > 0$ є фазою стиснення, а період τ зниженого тиску $\Delta P < 0$ – фазою розрідження. Одночасно з тиском в ударній хвилі виникає рух повітря від епіцентру вибуху. Закони зміни масової швидкості v і щільності ρ середовища в часі якісно аналогічні зміні тиску, проте внаслідок інерційності повітряного потоку період $\tau_{(+ск)}$ позитивної фази швидкісного напору $P_{ск} = 1/2 \cdot \rho v^2$ дещо більше, ніж τ_+ . Надлишковий тиск у хвилі та швидкісний напір є найважливішими характеристиками ударної хвилі, що визначають ефект її впливу на споруду.

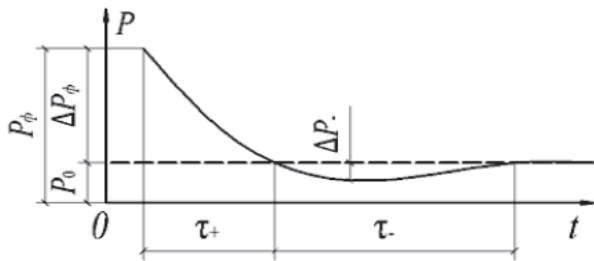


Рисунок 2 – Зміна тиску в ударній хвилі з часом у фіксованій точці

Основними параметрами, що визначають інтенсивність ударної хвилі, є надлишковий тиск на фронті ΔP_ϕ та тривалість фази стиснення τ_+ . Ці параметри залежать від маси C заряду ВР (вибухової речовини) певного типу (тобто енергії вибуху), висоти H , умов вибуху та відстані R від епіцентру.

Параметри повітряної ударної хвилі визначають за формулами М. А. Садовського [16], у яких вид вибухової речовини враховується тротиловим еквівалентом щодо ударної хвилі.

Тиск ΔP_ϕ , МПа, для сферичної повітряної ударної хвилі, яка вільно розповсюджується, визначають за формулою:

$$\Delta P_\phi = \frac{0,084}{\bar{R}} + \frac{0,27}{\bar{R}^2} + \frac{0,7}{\bar{R}^3}, \quad (1)$$

де \bar{R} – рівність параметрів на фронті хвилі на рівних «наведених» відстанях,

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{C}}, \quad (2)$$

де C – тротиловий еквівалент; R – відстань до епіцентру вибуху.

Максимальний надлишковий тиск на поверхні землі при повітряному вибуху залежить від висоти вибуху H , проте при вибухах на невеликій висоті та на відстанях $R > H$ (дальня зона) максимум тиску приблизно можна оцінити за формулою (1).

Тривалість фази стиснення τ_+ , с для наземного і приземного вибухів визначають за формулою:

$$\tau_+ = 1,5 \cdot 10^{-3} \sqrt[6]{C} \sqrt{R}. \quad (3)$$

Якщо відомою вважати величину P_ϕ (або ΔP_ϕ), яка може бути отримана, наприклад, за формулою (1), інші три параметри на фронті ударної хвилі визначають з наступних виразів:

$$v_\phi = \frac{C_0 \Delta P'_\phi \gamma^{-1}}{\sqrt{1 + \frac{1}{2} \Delta P'_\phi (\gamma + 1) / \gamma}} \quad (4)$$

де v_ϕ – швидкість фронту ударної хвилі;

$$D_\phi = C_0 \sqrt{1 + \frac{1}{2} \Delta P'_\phi (\gamma + 1) / \gamma} \quad (5)$$

де D_ϕ – швидкість поширення фронту ударної хвилі;

$$\rho_\phi = \frac{\rho_0 \left[1 + \frac{1}{2} \Delta P'_\phi (\gamma + 1) / \gamma \right]}{\left[1 + \frac{1}{2} \Delta P'_\phi (\gamma - 1) / \gamma \right]} \quad (6)$$

де ρ_ϕ – густина фронту ударної хвилі, C_0 – швидкість звуку в атмосфері, $\Delta P'_\phi = \Delta P_\phi / P_0$

Швидкісний натиск ударної хвилі:

$$P_{скф} = \frac{1}{2} \rho_\phi v_\phi^2 = \frac{\Delta P_\phi \Delta P'_\phi}{\left[(\gamma - 1) \Delta P'_\phi + 2\gamma \right]} \quad (7)$$

Температуру T_ϕ на фронті ударної хвилі визначають за формулою:

$$T_\phi = \frac{T_0 (1 + \Delta P'_\phi) \rho_0}{\rho_\phi} \quad (8)$$

Параметри з індексом 0 зазвичай приймають за даними міжнародної стандартної атмосфери лише на рівні моря (МСА): $P_0 = 0,101325$ МПа, $\rho_0 = 1,2249$ кг/м³, $T_0 = -288,16$ К.

ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЛІ НА ВИБУХОВУ ХВИЛЮ У ПК ЛІРА-САПР

Для захисної споруди розглянуто поверхневий



вибуховий вплив на бетонну оболонку товщиною 1,75 м до 20 тс/м² ударного навантаження.

При моделюванні прийнято допущення, що до 30 % вибухового впливу сприймає захисна оболонка, та до 20 % – демпфування ґрунтової засипки товщиною 7,0 м на покритті споруди. Перевіряється міцність та стійкість залізобетонної плити покриття споруди товщиною 60,0 см з обпиранням на сталеві балки висотою 1,65 м та споруди загалом (рис. 3, 4).

Нерівномірний розподіл тиску на плиту від 10 до 1 тс/м² прийнятий, виходячи з даних таблиць розповсюдження вибухового тиску за ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту» [19]. Характеристики можливих ударних впливів прийняті у відповідності з технічним завданням. Найбільшу вагу вибухової речовини відповідно до технічного завдання складає ракета Х22, тоді найбільша вага вибухової речовини дорівнює 630 кг. При цьому найбільше значення еквіваленту тротилу буде складати:

$$W = 1,37 \times 630 = 863,1 \text{ кг.}$$

Приведені результати нелінійного розрахунку плити покриття на стійкість до обвалення при аварійному ударному впливі на площі до

80 м² (рис.5). Методика нелінійного розрахунку залізобетону з тріщинами наведена в [17, 18]. Для моделювання нелінійного процесу навантажень використані фізично-нелінійні чотирихвужлові СЕ № 244 та тривужлові СЕ № 242 при шаговому процесі навантаження, реалізованому в ПК ЛІРА-САПР (закон деформування бетону С 32/40 (важкий) – експоненціальний № 21, арматури – білінійний № 14 та типи основного та додаткового армування).

Максимальний непружний перекіс f_{max} споруди при аварійному вибуховому впливі на плиту покриття за різними напрямками становить: $X_1 = 4,37$ мм, $X_2 = -5,1$ мм, $Y_1 = -6,9$ мм, $Y_2 = 7,76$ мм, $Z_1 = -48,2$ мм, $Z_2 = 1,43$ мм, та обчислюється за формулою (9) (рис. 6).

$$f_{max} = K_{над} \times \sqrt{(X_1 + X_2)^2 + (Y_1 + Y_2)^2 + (Z_1 + Z_2)^2}, \quad (9)$$

де $K_{над}$ – коефіцієнт надійності.

$$f_{max} = 1,05 \times \sqrt{(9,47)^2 + (14,66)^2 + (49,63)^2} = 55,24 \text{ мм;}$$

$H = 17,15$ м при допустимому $f_u = 1/150$ для бетонних конструкцій по ДБН В.2.6-98:2009 [20]:

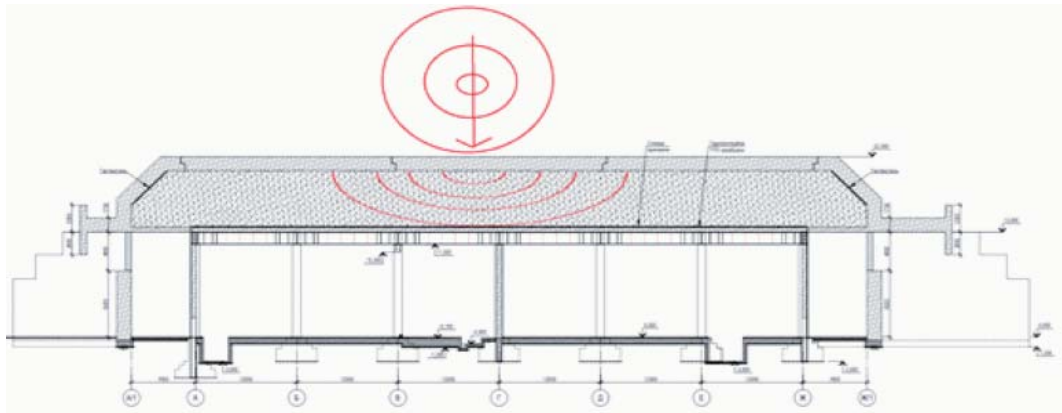


Рисунок 3 – Схема впливу вибухового навантаження на захисну споруду

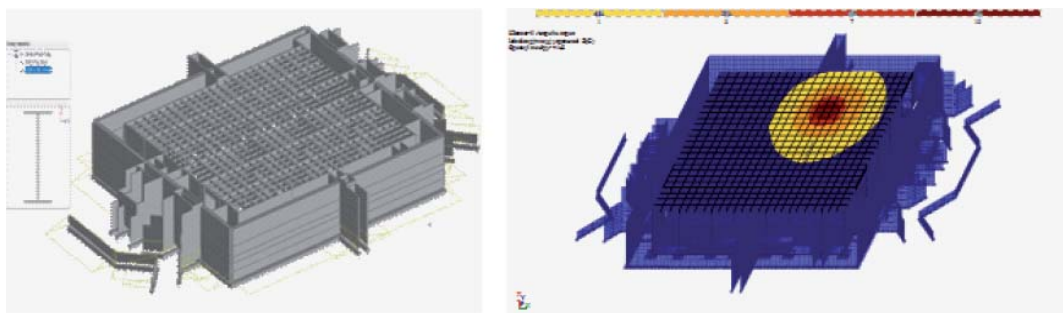


Рисунок 4 – Тривимірний вид моделі та розподілений вибуховий вплив на плиту покриття

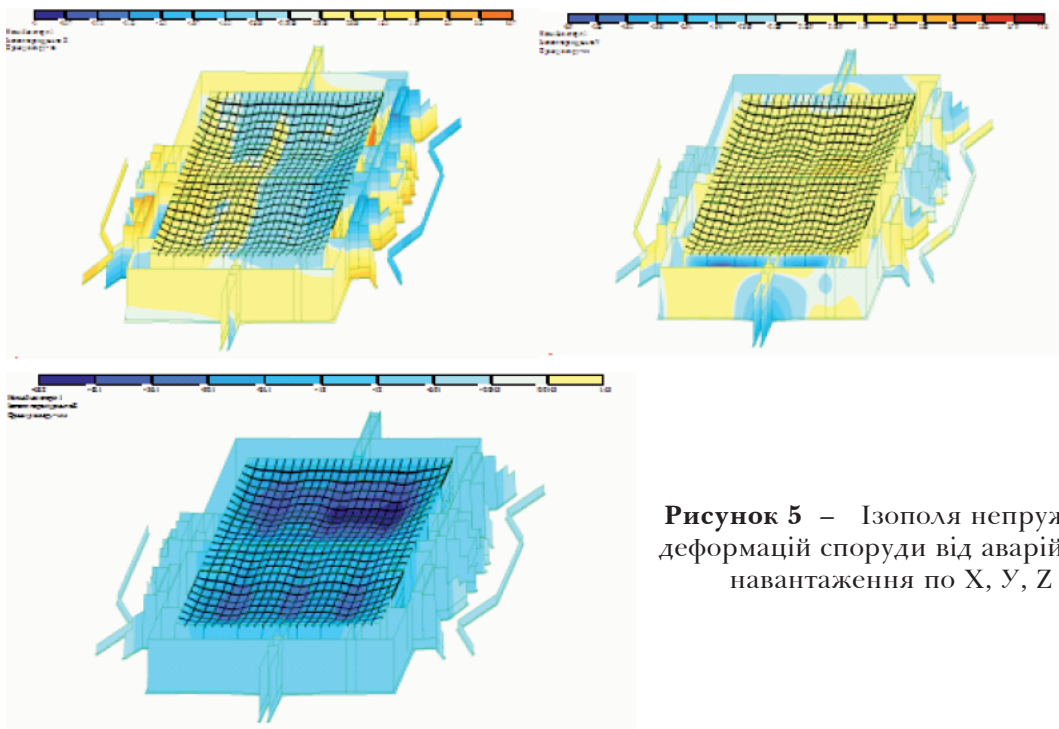


Рисунок 5 – Ізополю непружних деформацій споруди від аварійного навантаження по X, Y, Z

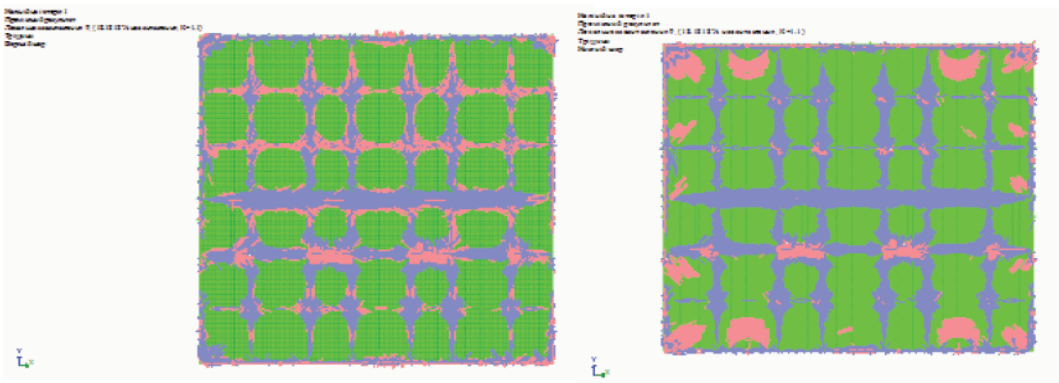


Рисунок 6 – Тривимірний вид моделі та розподілений вибуховий вплив на плиту покриття

$$\frac{f_{\max}}{H} = \frac{0,05524}{17,15} = 0,003156556 = \frac{1}{316,8} < \frac{1}{150},$$

що менше допустимого.

В плиті покриття розвиваються верхні та нижні зони тріщин та утворюються пластичні шарніри, але розрив арматури в нижній зоні плити та прогресуючого обвалення не зафіксовано (рис. 6). Тому можна стверджувати, що при такому аварійному вибуховому впливі на плиту покриття при наявності захисного «тюфяка» загальна стійкість до обвалення забезпечується.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Розрахунок споруди при ударному впливі на плиту покриття на стійкість до прогресуючого обвалення при додатковому навантаженні до

20 тс/м² (при врахуванні демпфування ґрунтової основи до 20 %) на площі до 80,0 м² з коефіцієнтом динамічності 1,2 по ПК ЛІРА-САПР в фізично-нелінійній постановці свідчить, що в плиті розвиваються зони тріщин і утворюються пластичні шарніри, максимальні деформації плити перевищують 50 мм. При цьому розрив арматури в нижній зоні плити не зафіксовано. Отримані результати вказують, що експлуатаційна придатність плити не забезпечується, але подальше прогресуюче обвалення плит не відбувається при забезпеченні армування: в нижньому шарі плити в середині прольоту не менше 25,76 см²/пм (Ø 16 мм кроком 200 мм + Ø 20 мм кроком 200мм при товщині плити 60см); в верхньому шарі плити над стінами не менше 34,59 см²/пм (Ø 16 мм кроком 200 мм + Ø 25 мм кроком



200 мм) та при забезпеченні необхідної за розрахунком довжини зони анкерування арматури.

Максимальний непружний перекис споруди при аварійному вибуховому впливі на плиту покриття становить 55,24 мм (1/317), що менше допустимого по ДБН В.2.6-98:2009 для залізобетонних конструкцій.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Алмазов В.О. Залізобетонні каркаси без прогресуючої руйнації. Москва: МГСУ, 2008. 32 с.
2. Бирбраер А.Н. Екстремальні впливи на споруди. Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2009. 594 с.
3. Барабаш М.С. Дослідження стійкості конструкцій будівель та споруд до прогресуючого руйнування при аварійних впливах. Науково-технічний журнал: Нові технології в будівництві. 2010. № 2 (20). С.19–23.
4. Varabash M.S., Kostyra N.O., Pysarevskiy V.Y. Strength-strain state of the structures with consideration of the technical condition and changes in intensity of seismic loads IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. № 708. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/708/1/012044>
5. Барабаш М.С., Костира Н.О., Томашевський А.В. Визначення напружено-деформованого стану та міцності пошкоджених несучих конструкцій інструментами ПК «LIRA-SAPR». Український журнал будівництва та архітектури. 2022. № 1(007). С. 7-14. URL: <https://doi.org/10.30838/J.VPSACEA.2312.220222.7.827>
6. Максименко В.П., Барабаш М.С., Писаревський Б.Ю. Методика оцінки напружено-деформованого стану конструкцій будівлі на основі методу підсистем. Науково техн. журнал «Будівельне виробництво». 2021. № 71.
7. Varabash M., Pisarevskiy V., Bashinsky Ya. Material damping in dynamic analysis of structures (with LIRA-SAPR program). Civil and Environmental Engineering, 2020. № 16 (1). P. 63-70.
8. Немчинов Ю.И. Природные и техногенные опасности. Аварии и их последствия. Київ: ДП НДІБК, 2020. 300с.
9. Немчинов Ю.И., Мар'єнков Н.Г. Хавкін А.К., Бабік К.М. Проекування будівель із заданим рівнем забезпечення сейсмостійкості. Київ: Гудименко С.В., 2012. 384 с.
10. Расторгуев Б.С. Деформування конструкцій перекриттів каркасних будівель після раптового руйнування однієї колони. Сейсмостійке будівництво. Безпека споруд, 2006. № 1. С. 12–15.

11. Powell, Graham. Progressive Collapse: Case Studies Using Nonlinear Analysis. SEAOC Annual Convention, Monterey, August, 2004. 14 p.
12. Gilmour J.R., Viridi K.S. Numerical modelling of the progressive collapse of framed structures as a result of impact or explosion. 2nd International PhD Symposium in Civil Engineering. Budapest, 1998.
13. Kaewkulchai G., Williamson E.B. Beam element formulation and solution procedure dynamic progressive collapse analysis. Journal "Computer and Structures". 2004. № 82. P. 639–651.
14. Pretlove A.J., Ramsden M. and Atkins A. G. Dynamic Effects in Progressive Failure of Structures. International Journal of Impact Engineering. 1991. № 11(4). P.539–546.
15. Izzudin B.A., Vlassis A.G., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss. Part I. Simplified assessment framework. Engineering structures. 2008. № 30 (5). P. 1308-1318.
16. Izzudin B.A., Vlassis A.G., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A. Part II: Application. Engineering structures. 2008. № 30 (5). P. 1424–1438.
17. Садовский М.А. Выбранные работы. Геофизика та фізика вибуху. Москва: Наука, 2004. 440с.
18. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2017. 39с.
19. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012. Єврокод 2. Проекування залізобетонних конструкцій. Загальні положення. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. 115с.
20. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. Київ: Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України, 2023. 119с.
21. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2011. 71с.

REFERENCES

1. Almazov V. O. (2008). Reinforced concrete frames without progressive collapse. Moscow: MGSU.
2. Birbraer A. N. (2009). Extreme impacts on structures. St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House.



3. Barabash M. S. (2010). Continuing the stability of structures built up before the progressive collapse during emergency inflows. *Scientific and technical journal: New technologies in everyday life*, 2(20), 19–23.
4. Barabash, M. S., Kostyra, N. O., & Pysarevskiy, B. Y. (2019). Strength-strain state of the structures with consideration of the technical condition and changes in intensity of seismic loads. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708, 012044. Retrieved from <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/708/1/012044>
5. Barabash M.S., Kostyra N.O. & Tomashevsky A.V. (2022). The value of stress-strain resistance of damaged load-bearing structures using PC “LIRA-SAPR” tools. *Ukrainian magazine of everyday life and architecture*, 1(007), 7-14. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.220222.7.827>
6. Maksymenko V. P., Barabash M. S. & Pisarevsky B. Yu. (2021). Methodology for assessing the stress-strain structure of a structure based on the Subsystem method. *Scientific and Technical Journal "Budivne Virobnitstvo"*, 71. ISSN: 2524-2555
7. Barabash M., Pisarevskiy B. & Bashinsky Ya. (2020). Material damping in dynamic analysis of structures (with LIRA-SAPR program). *Civil and Environmental Engineering*, 16 (1), 63-70.
8. Nemchynov, I. (2021). Building Science and Seismic Safety Provision in Ukraine Considering Eurocode Recommendations. *Science and Construction*, 29 (3), 3-14. Retrieved from <https://doi.org/10.33644/2313-6669-14-2021-12>.
9. Nemchinov, Y.I., Marienkov, N.G., Khavkin, A.K., Babik, K.M. (2012). *Design of Buildings with a Specified Level of Seismic Resistance*. Kyiv: Hudymenko S.V.
10. Rastorguev B. S. (2006). Deformation of the floor constructions of frame structures after rapt ruination of one column. *Seismic engineering. Safety of building objects*, 1, 12–15.
11. Powell, Graham. (2004). *Progressive Collapse: Case Studies Using Nonlinear Analysis*. Monterey: SEAOC Annual Convention.
12. Gilmour J.R., Viridi K.S. (1998). Numerical modelling of the progressive collapse of framed structures as a result of impact or explosion. 2nd International PhD Symposium in Civil Engineering, Budapest 1998.
13. Kaewkulchai G., Williamson E.B. (2004). Beam element formulation and solution procedure dynamic progressive collapse analysis. *Journal "Computer and Structures"*, 82, 639–651.
14. Pretlove A.J., Ramsden M. and Atkins A.G. (1991). *Dynamic Effects in Progressive Failure of Structures*. *International Journal of Impact Engineering*, 11 (4). P. 539–546.
15. Izzudin, B. A., Vlassis, A. G., Elghazouli, A. Y., & Nethercot, D. A. (2008). Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss. Part I. Simplified assessment framework. *Engineering Structures*, 30(5), 1308-1318.
16. Izzudin, B. A., Vlassis, A. G., Elghazouli, A. Y., & Nethercot, D. A. (2008). Part II: Application. *Engineering Structures*, 30(5), 1424–1438.
17. Sadovsky M. A. (2004). *The selected works. Geophysics and physics of explosion*. Moscow: Nauka.
18. DBN V.1.1-7:2016. (2017). *Fire safety of Construction Objects. General Requirements*. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine.
19. DSTU N B EN 1992-1-2:2012. (2013). *Eurocode 2. Design of reinforced concrete structures*. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine.
20. DBN V.2.2-5:2023. (2023) *Civil defense protective structures*. Kyiv: Ministry of Community, Territories and Infrastructure Development of Ukraine.
21. DBN V.2.6-98:2009. (2011). *Constructions of buildings and structures. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions*. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine.

Стаття надійшла до редакції 01.10.2023 року