

## Вплив вибухової ударної хвилі на покриття захисної споруди критичної інфраструктури

Володимир Сахаров<sup>1</sup>, Олександр Литвин<sup>2</sup>

Київський національний університет будівництва і архітектури

31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037,

<sup>1</sup>v.sakharov@ib.uz.zgora.pl, orcid.org/0000-0002-9381-3283

<sup>2</sup>lytvyn.ov@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-2818-3457

DOI: 10.32347/0475-1132.47.2023.107-114

**Анотація.** У роботі представлено результати аналізу напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій захисної плити споруди укриття на дію вибухової ударної хвилі при детонації бойової частини дрону-камікадзе. Під час проектування захисних споруд критичної інфраструктури комп'ютерне моделювання використовується для оцінки реального впливу вибухового навантаження на міцність конструктивних елементів. Час дії активної фази вибухового навантаження є дуже коротким і становить лише тисячні долі секунди, тому моделювання доцільно проводити за допомогою явних методів прямого інтегрування в часі.

Конструкція укриття, що розглядається в роботі, є окремою спорудою каркасного типу, яка включає в себе залізобетонну плиту на металевій балочній клітині з балок двотаврового перерізу. Зверху плити влаштована піщана засипка. Дослідження проводилися прямим динамічним методом (explicit method) у програмному комплексі SIMULIA Abaqus з урахуванням моделей нелінійної поведінки матеріалів у тривимірній постановці. Для залізобетонних конструкцій була врахована дискретно розташована арматура. Для бетону використано модель "Concrete Damage Plasticity", що враховує накопичення пошкоджень. Розроблена розрахункова схема укриття представляла собою фрагмент покрівлі захисної конструкції укриття в умовах циклічної симетрії.

Вплив вибухової хвилі на конструкції моделювався за допомогою алгоритму CONWER. У статті наведено основні принципи врахування вибухового навантаження за цим алгоритмом.

За результатами досліджень показано, що при детонації дрону-камікадзе від вибухової



**Володимир Сахаров**  
д.т.н., професор кафедри  
геотехніки



**Олександр Литвин**  
асистент кафедри  
геотехніки

хвилі утворився кратер у піщаній засипці, що відкрив плиту. Отримано, що деформації, пов'язані із виникненням тріщин у залізобетонній плиті відбувається в різні моменти часу. Показано, що незважаючи на виявлені пошкодження плити, конструкція захисту в цілому витримала вибухове навантаження. Інтенсивність тиску вибухової ударної хвилі значно знижується по мірі віддалення від місця вибуху. Такий підхід є ефективним способом зменшення впливу вибухової ударної хвилі.

**Ключові слова.** Вибухова хвиля, розривна хвиля, тротил, захисні споруди, імпульс, явний метод, критична інфраструктура, ґрунт, бетон.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Під час військової агресії російської федерації проти України, інженерам доводиться розробляти конструкції для захисту об'єктів критичної інфраструктури перед атаками безпілотників-камікадзе. Детонація бойової частини дрону створює вибухову

ударну хвилю інтенсивного тиску, спрямовану на руйнування інженерних конструкцій [1, 2]. Під час проектування захисту споруд критичної інфраструктури, використання комп'ютерного моделювання дозволяє оцінити реальний вплив вибухового навантаження на міцність елементів конструкцій. Час дії активної фази вибухового навантаження дуже короткий і становить лише тисячні долі секунди. В таких умовах моделювання доцільно проводити на базі явних методів прямого інтегрування в часі, що також дозволить врахувати роботу матеріалів конструкцій при високих швидкостях деформацій.

Укриття для захисту об'єктів, що розглядається, являє собою окрему споруду каркасного типу. Конструкція включає в себе залізобетонну плиту, що лежить поверх металевої балочної клітини із балок двотаврового перерізу. Залізобетонна плита є головним захисним елементом укриття, що за рахунок металевої балочної клітини забезпечує перерозподіл ударного навантаження на несучі стіни. Залізобетонна плита армована двома сітками з чарункою розміром 200x200 мм в верхній і нижній зонах. Плита з'єднана із балками за допомогою стад-болтів, які виконують ключову роль у забезпеченні просторової системи цілісності конструкції, забезпечуючи взаємодію між металевими елементами та бетонною плитою. Зверху плити влаштована піщана засипка. Засипка виконує важливу роль у забезпеченні додаткового захисту конструкції і зменшення амплітуди пікового навантаження на плиту, за рахунок амортизації зовнішніх впливів, а також розподілу навантажень на більшу поверхню плити.

#### АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У публікації [4] автори досліджують вплив ударної хвилі на укриття та розглядають питання впливу навантажень, викликаних вибухом різних за спорядженням боеприпасів. Автори використовують числові методи для моделювання взаємодії ударної хвилі з укриттям та досліджують вплив різних факторів на стійкість укриття до ударної

хвилі.

В роботі [5] пропонують удосконалену методику розрахунку конструкцій покриття закритих фортифікаційних споруд на проникнення, пробивання, рикошет та фугасну дію.

Також [6] досліджуються методи реконструкції тиску ударної хвилі після вибуху та розглядається можливість використання цих даних для оцінки потужності пошкодження від вибуху боеприпасів.

У статті [7] автори досліджують вплив вибуху на житлові будівлі та розглядають можливість відновлення елементів, які були частково зруйновані.

#### МЕТА РОБОТИ

Основна мета дослідження є аналіз змін напружено-деформованого стану конструкції укриття, внаслідок вибухової ударної хвилі, викликаної детонацією бойової частини безпілота-камікадзе. Дослідження виконувались засобами комп'ютерного моделювання з використанням програмного комплексу Simulia Abaqus у просторовій постановці з урахуванням нелінійної роботи матеріалів. Проведення аналізу дозволяє розкрити характер взаємодії і руйнування елементів укриття при вибуховому навантаженні, а також виявити механізми та способи щодо підвищення міцності та живучості конструкції.

#### ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є конструкція дахового укриття. Для потреб дослідження було розроблено розрахункову схему укриття, яка представляє собою фрагмент покриття захисної оболонки укриття в умовах циклічної симетрії (рис. 1). Обраний фрагмент включає дві площини симетрії в плані, що дозволяє здійснити додаткову редукцію та аналізувати лише  $\frac{1}{4}$  загальної конструкції, враховуючи відповідні граничні умови на площинах симетрії. Розрахункова модель включає в себе металеві балки та залізобетонну армовану плиту покриття, по якій виконана засипка піском (рис.2).

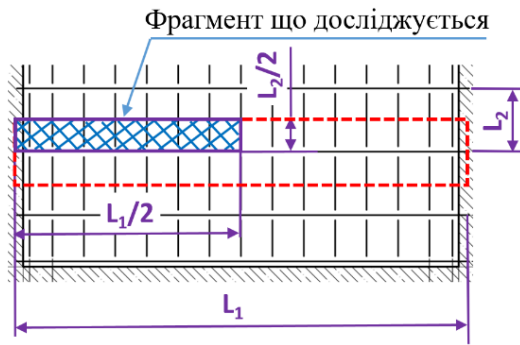


Рис.1. Фрагмент покриття захисної оболонки укриття що досліджується  
Fig.1. Fragment of the covering of the protective shell of the shelter under investigation

З метою більшого наближення до реальних умов моделювання матеріалів елементів конструкції покриття розроблена скінченна елементна модель досліджуваного фрагменту передбачала моделювання елементів конструкції, як об'ємних середовищ. Залізобетонна плита розглядалась як гетерогенне середовище з дискретно розташованою арматурою, згідно проектного рішення. Це дозволило досліджувати поведінку кожного матеріалу елементів покриття окремо при їх спільній конструкційній взаємодії.

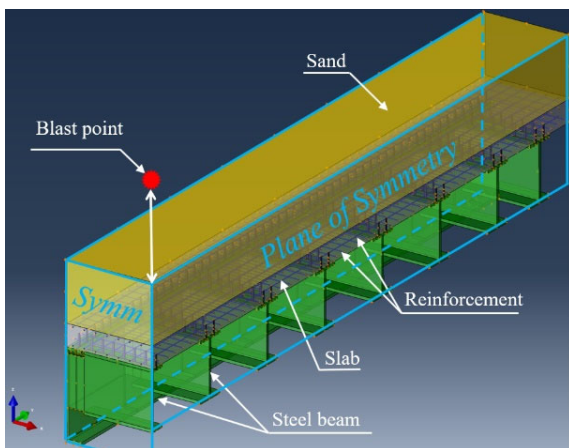


Рис.2. Фрагмент розрахункової схеми  
Fig.2. Fragment of the calculation scheme.

Для всіх матеріалів було використано восьми вузлові скінченні елементи (С3D8R) з однією точкою інтегрування. В задачах вибухового навантаження крок і розмір сітки скінчених елементів (СЕ) в значній мірі впливає на результати. В даній роботі сітка

СЕ була розроблена на базі попередніх розрахунків, за умов отримання збіжних результатів. Прийнятий варіант передбачав розміри СЕ: для елементів, які моделюють арматуру - до 2.5 см, для інших матеріалів - не більше 5 см.

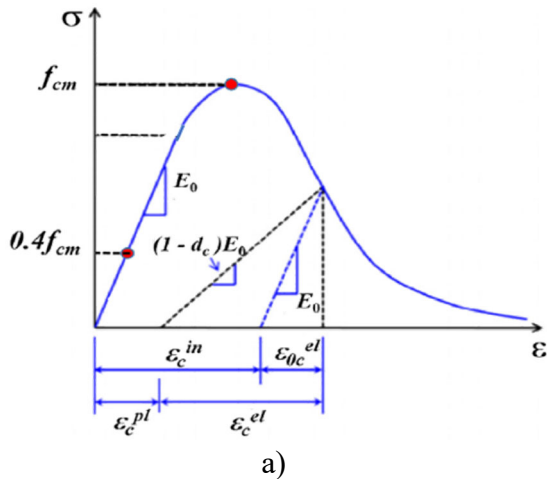
Для моделювання бетону використано модель Concrete damage plasticity (CDP), що розроблена на базі теорії пластичної течії і яка більш повно враховує поведінку цього матеріалу при статичних і динамічних навантаженнях [3]. Для опису нелінійної поведінки бетону модель використовує концепцію ізотропного еластичного пошкодження.

В цій моделі розглядається два основних механізми руйнування матеріалу – утворення тріщини при розтягу та роздавлювання при стисненні. Діаграми, що характеризують поведінку матеріалу при роботі на стиск і розтяг показано на (рис. 3).

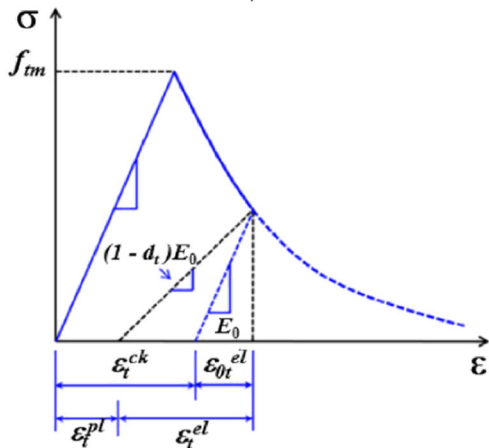
Розподіл еквівалентних пластичних деформацій визначається на підставі поверхні текучості. Враховується, що бетон працює в трьох основних стадіях: абсолютно пружна ізотропна стадія, стадія пластичної роботи та стадія руйнування. Через неможливість визначення реальної ширини розкриття тріщини, для забезпечення суцільної сітки скінчених елементів використовується метод “розмазування” тріщини на групу скінчених елементів. Таким чином, в застосовуваній діаграмі стану матеріалу після досягнення критичного напруження або деформації вводиться спадаюча гілка з умовним фізичним значенням пошкодження. Ця частина діаграми моделює розподіл тріщин по певній групі скінчених елементів, що дозволяє отримати числове рішення. В свою чергу це накладає додаткові вимоги, щодо добору густоти сітки СЕ. Таке представлення роботи бетону під навантаженням дозволяє відобразити ключові особливості поведінки бетону.

Залежно від рівня досягнутого напружено-деформованого стану розвантаження бетонного зразка відбувається за різними кривими. В залежності від ступеню апроксимації ці криві можуть бути представлені прямими відрізками (ламаною) зі змінним

кутом нахилу. Зміна січного модуля «пружно-пластичності» описується за допомогою двох параметрів пошкодження  $d_c$  (damage compression) та  $d_t$  (damage tension) які вважаються функціями пластичних деформацій. Ці параметри пошкодження можуть приймати значення від нуля, що відповідає непошкодженому матеріалу, до одиниці, що відповідає повній втраті міцності.



а)



б)

Рис.3. Діаграми поведінки бетону:

а) - стиск, б) – розтяг

Fig.3. Concrete behavior diagrams:

а) - compression, б) - tension

Якщо модуль  $E_0$  – це початкова (неушкоджена) пружна жорсткість матеріалу, то співвідношення напруження-деформації при одноосному навантаженні на розтяг ( $\sigma_t$ ) та на стиск ( $\sigma_c$ ) відповідно можна опасати наступними рівняннями:

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \varepsilon_t^{\sim pl}) \quad (1)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \varepsilon_c^{\sim pl}) \quad (2)$$

де:

$\varepsilon_t, \varepsilon_c$  - загальна деформація розтягу і стиску відповідно,

$\varepsilon_t^{\sim pl}, \varepsilon_c^{\sim pl}$  - еквівалентні пластичні деформації розтягу та стиску відповідно.

При одноосному циклічному навантаженні жорсткість матеріалу зазнає деградації через появу та закриття раніше утворених мікротріщин. Важливою особливістю бетону при циклічному навантаженні є ефект відновлення жорсткості. У багатьох квазікрихких матеріалах, до яких належить і бетон, жорсткість на стиск відновлюється після закриття тріщини, якщо навантаження змінюється з розтягу на стиск. Проте, при переході від стиску до розтягу жорсткість не відновлюється, оскільки від стиску утворюються роздавлюючі мікротріщини. Таким чином коефіцієнти відновлення жорсткості є окремим параметром, який можна вводити при моделюванні.

На (рис. 4) зображено цикл одноосного навантаження, що відповідає поведінці за замовчуванням.

$W_c$  -коефіцієнти відновлення жорсткості при переході від розтягу до стиску ( $W_c = 1$ ).

$W_t$  -коефіцієнти відновлення жорсткості при переході від стиску до розтягу ( $W_t = 0$ ).

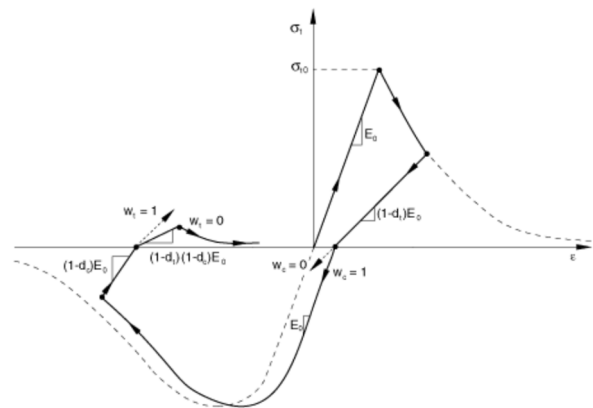


Рис.4. Зміна жорсткості бетону при циклі одноосного навантаження

Fig.4. Change in concrete stiffness during uniaxial load cycle

Для моделювання арматури та металевих конструкцій було використано критерій пластичності Мізеса. Ця модель має дві ді-

лянки – зону пружної роботи та зону пластичності.

Моделювання дискретно розташованої арматури у залізобетонній плиті реалізувалося за допомогою функції «embedded region» [3]. Це дозволило врахувати взаємодію арматурних стрижнів та бетону без узгодження вузлів сіток СЕ. Умови контакту між арматурою та бетоном моделюються шляхом надання визначеної жорсткості при розтягу бетону. Це враховує передачу навантаження через арматурні стрижні через тріщини.

Піщана засипка має невелику товщину і повинна враховувати перерозподіл навантажень на плиту з урахуванням винесення ґрунту. Тому моделювався піщаного середовища виконувалось пружними елементами з додатковим критерієм видалення скінчених елементів при розтягу.

Вибух в атмосфері, спричинений детонацією дрону-камікадзе, створює інтенсивну стиснуту газову зону, яка породжує ударну хвилю, що розповсюджується у всіх напрямках. Вплив навантаження від вибуху представляє собою складний процес. Як один із варіантів, цей вплив можна визначити для сферичних падаючих хвиль (атмосферний вибух) за допомогою емпіричних даних, отриманих при використанні програми Conventional Weapons Effects Program (CONWEP), яка зарекомендувала себе в задачах цього класу.

Модель CONWEP використовує принцип масштабування відстані, який базується на відстані від джерела вибуху до поверхні навантаження та кількості вибухової речовини (у тротиловому еквіваленті). Для конкретної масштабованої відстані програма дозволяє розрахувати такі дані, як максимальний надлишковий тиск, час прибуття хвилі, тривалість позитивної та негативної фаз, коефіцієнт згасання для падаючого та відбитого тиску. Для апроксимації залежності тиску від часу (P-t), CONWEP використовує експоненціальне згасання тиску та використовує рівняння, виведені Лабораторією балістичних досліджень Міністерства армії США для визначення параметрів пікового тиску, тривалості, часу прибуття та імпульсу.

Далі визначається коефіцієнт загасання  $A$ :

$$P(t) = P_{SO} \left( 1 - \frac{(t-t_a)}{t_d} \right) \exp \left( -A \frac{(t-t_a)}{t_d} \right) \quad (3)$$

де:

$P(t)$  - тиск в момент часу  $t$ ,

$P_{SO}$  - пік падаючого надлишкового тиску в момент часу  $t - t_a$ ,

$t_a$  - час приходу,

$A$  - коефіцієнт згасання.

На близьких відстанях негативна фаза незначна і для розрахункових цілей ігнорується CONWEP. Однак негативна фаза набуває більшого значення на більш віддалених відстанях.

Повна історія залежності P-t, що використовується CONWEP представлена на (рис.5).

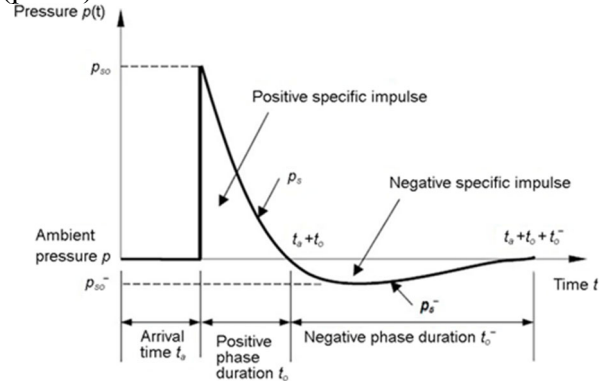


Рис.5. Схема історії зміни тиску вибухової ударної хвилі від часу під час вибуху (Міністерство армії США, 1990).

Fig.5. Time history of the blast pressure during an explosion (US Department of the Army, 1990)

Моделювання було виконано на базі явного методу чисельного інтегрування в часі. Загальна кількість невідомих становила 1045539, а мінімальний крок інтегрування склав  $8.6 \cdot 10^{-7}$  с.

Внаслідок проведених досліджень було встановлено, що в процесі вибуху в піщаному насипі утворився кратер. При цьому в зоні епіцентру ґрунт був повністю викинутий з поверхні плити (рис. 6). З цього можна зробити висновок, що в цій зоні присутність піщаного насипу невеликої товщини має незначний вплив на напружено-деформований стан конструкцій покриття від ударної хвилі вибуху.



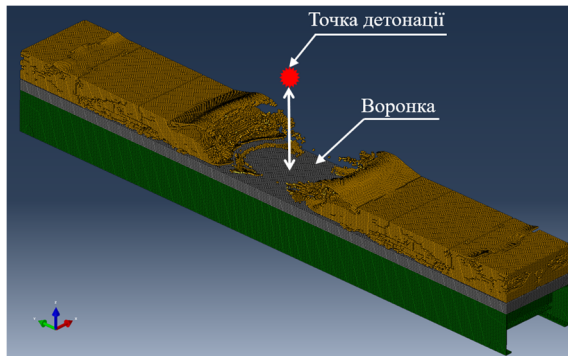
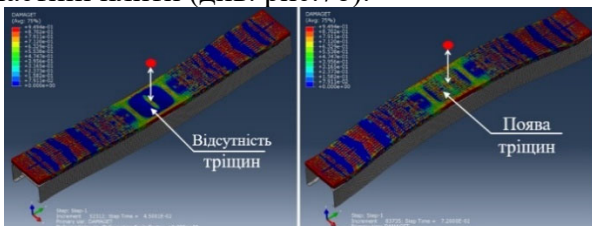


Рис.6. Утворення вибухової воронки у піщаній засипці.  
Fig.6. The formation of an explosive crater in a sand fill.

На початку, коли ударна хвиля досягла конструкції, в зоні епіцентру в нижній частині плити утворились тріщини (див. рис.7а). В наступний проміжок часу, через коливання, спричинені ударом вибухової хвилі, тріщини також з'явилися у верхній частині плити (див. рис.7б).



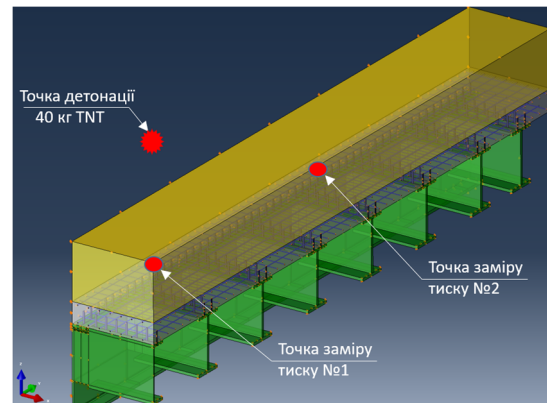
а) час=0.045с                      б) час=0.075с

Рис.7. Зони деградації бетону (ефект утворення тріщин) внаслідок розтягу в різні проміжки часу на початку вибуху.  
Fig.7. Zones of concrete degradation (the effect of the formation of cracks) due to stretching at different time intervals at the beginning of the explosion.

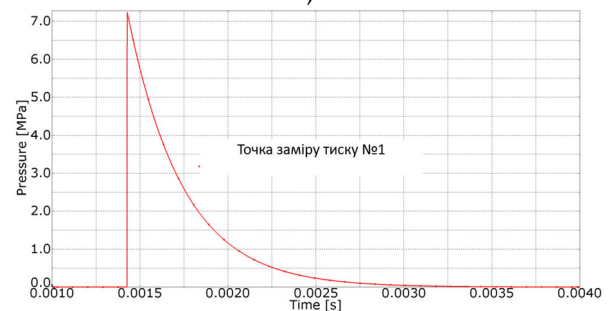
Аналіз розподілу тиску на плиті в часі (рис.8) виявив, що ударна хвиля досягає поверхні укриття в різні моменти часу. Різниця в часі становить мілісекунди. Пікові значення тиску істотно зменшуються з віддаленням від місця детонації, тому при проектуванні захисних споруд необхідно максимально віддалити місце вибуху від ключових конструкцій укриття.

Визначення оптимальних відстаней від зони детонації вибухової частини до основних конструктивних елементів споруди вимагає проведення окремих досліджень за аналогічним алгоритмом. Враховуючи швидке згасання тиску від ударної хвилі в просторі, такий підхід є найбільш

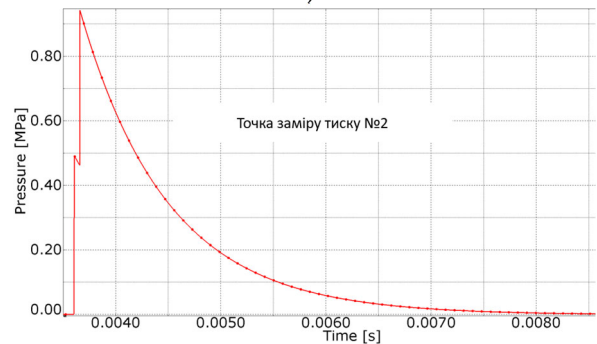
раціональним для мінімізації впливу вибухової ударної хвилі.



а)



б)



в)

Рис.8. Розподіл тиску на поверхні плити від вибухової хвилі: а) – схема розміщення точок фіксації тиску, б) – історія зміни тиску ударної хвилі в точці №1, в) – історія зміни тиску ударної хвилі в точці №2.

Fig.8. Distribution of pressure on the surface of the plate from the blast wave: а) – a diagram of the placement of pressure fixation points, б) – a history of changes in the pressure of the shock wave at point №1, с) – a history of changes in the pressure of the shock wave at point №2

Дослідження показали, що незважаючи на виявлені деформації плити, за рахунок утворення деградації пружної жорсткості (утворення тріщин), конструкція захисту в

цілому витримала вибухове навантаження.

Варто звернути увагу, що отримані пошкодження істотно знижують міцність плити і потребують її відновлення (рис.9).

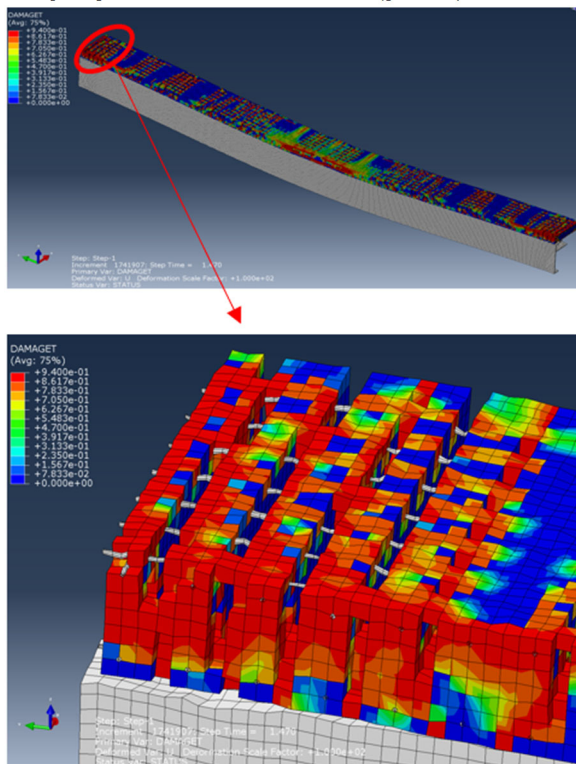


Рис.9. Утворення тріщин в місці стику плити покриття зі стіною.

Fig.9. The formation of cracks at the junction of the covering slab with the wall.

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Застосування прямих динамічних методів у поєднанні з нелінійними моделями деформування матеріалів дозволяє більш глибоко досліджувати зміни в напружено-деформованому стані конструкцій від вибухового навантаження.

Встановлено, що вибрана товщина піщаного насипу має незначний вплив на зміни в напружено-деформованому стані залізобетонної плити покрівлі під час вибухового навантаження. Внаслідок вибуху утворений кратер повністю відкрив плиту в зоні епіцентру.

Результати досліджень показали, що в розглянутих умовах детонація дрону-камікадзе призвела до виникнення локальних пошкоджень в залізобетонній плиті конструкції укриття. В цілому плита зберегла просторову жорсткість і виконала своє завдання. Варто зауважити, що прогнозовані

пошкодження істотно знижують міцність плити і потребують її відновлення.

Виявлено, що інтенсивність тиску вибухової ударної хвилі значно знижується по мірі віддалення від місця вибуху. Такий підхід є ефективним способом зменшення впливу вибухової ударної хвилі.

В подальших дослідженнях автори планують проведення досліджень з метою пошуку найбільш раціональних відстаней від місця детонації до основних елементів споруди укриття та конструктивних рішень щодо їх реалізації.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Коцюруба В.І. Методика розрахунків та обґрунтування вимог до інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури від БпЛА типу баражуючий боєприпас./ В.І. Коцюруба, А.С. Білик, А.О. Веретнов, Г.С. Гайдарли, Р.М. Борта, Б.І. Тертишний // *Опір матеріалів і теорія споруд. Науково-технічний збірник.* – К.: КНУБА. – 2022. – №109. – С. 164-183. DOI: 10.32347/2410-2547.2022.109.164-183
2. Unified facilities criteria (ufc) structures to resist the effects of accidental explosions UFC 3-340-02. 5 December 2008, P.1443-1446.
3. Dassault Systèmes Simulia Corp. “ABAQUS Analysis User’s Manual, Version 6.12.” Providence, Rhode Island: Dassault Systèmes Simulia Corp. 2012b.
4. Коцюруба В.І. Вплив повітряної ударної хвилі на укриття / В.І. Коцюруба, І.П. Даченко, В.О. Дачковський, Р.М. Черевко, В.М. Полюляк, О.А. Іващук, І.І. Фурман // *Опір матеріалів і теорія споруд. Науково-технічний збірник.* – К.: КНУБА. – 2020. – №105. – С. 133-144. DOI: 10.32347/2410-2547.2020.105.133-144
5. Волощенко О.І. Удосконалення методики розрахунку конструкцій покриття закритих польових фортифікаційних споруд для забезпечення живучості військ у сучасному збройному конфлікті / О.І. Волощенко, М.Г. Кушніренко, І.В. Черних // *Опір матеріалів і теорія споруд. Науково-технічний збірник.* – К.: КНУБА. – 2021. – №106. – С. 282-295. DOI: 10.32347/2410-2547.2021.106.282-295.
6. Wang L. Study on Pressure Reconstruction Method of Explosion Shock Wave / L. Wang, D. Kong // *Journal of Applied Fluid Mechanics,* – 2023. – Vol. 16, No. 7, pp. 1442-1454. ISSN 1735-3572. DOI: 10.47176/JAFM.16.07.1690.

7. Faiza Mohamed. Investigation on Air-Blast Explosion Effect on reinforced concrete Buildings (CaseStudy) / Faiza Mohamed, Zauba A., Aziz Al-Rawi, Ahmed El-Badawy Sayed, Abubaker M. Omer Barahim, Yasser R. Tawc // *International License – Research Square.* – 21p. doi.org/10.21203/rs.3.rs-2058537/v1

on Air-Blast Explosion Effect on reinforced concrete Buildings (CaseStudy). *International License – Research Square.* – 21p. doi.org/10.21203/rs.3.rs-2058537/v1

## REFERENCES

1. Kotsiuruba, V.I., Bilyk, A.S., Veretnov, A.O., Haidarly, H.S., Borta, R.M., Tertyshnyi, B.I. (2022). Metodyka rozrakhunkiv ta obgruntuvannia vy-moh do inzhenerneho zakhystu ob'ektiv krytychnoi infrastruktury vid BpLA typu barazhuyuchy boieprypas [Method of calculations and substantiation of requirements for engineering protection of critical infrastructure objects from UAVs with warheads]. *Opir materialiv i teoriiia sporud. Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk.* Kyiv: KNUBA, 109, 164-183. DOI: 10.32347/2410-2547.2022.109.164-183. (in Ukrainian).
2. Unified facilities criteria (ufc) structures to resist the effects of accidental explosions UFC 3-340-02. (2008). 5 December 2008, P.1443-1446.
3. Dassault Systèmes Simulia Corp. "ABAQUS Analysis User's Manual, Version 6.12." Providence, Rhode Island: Dassault Systèmes Simulia Corp. 2012b.
4. Kotsiuruba V.I., Datsenko I.P., Dachkovskiy V.O., Cherevko R.M., Poliuliak V.M., Ivashchuk O.A., Furman I.I. (2020). Vplyv povitrianoi udarnoi khvyli na ukryttia [Influence of air shock wave on shelter]. *Opir materialiv i teoriiia sporud. Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk.* Kyiv: KNUBA, 109, 133-144. DOI: 10.32347/2410-2547.2020.105.133-144 (in Ukrainian).
5. Voloshchenko O.I., Kushnirenko M.H., Chernykh I.V. (2021). Udoshkonalennia metodyky rozrakhunku konstruktsii pokryttia zakrytykh polovykh fortyfikatsiinykh sporud dlia zabezpechennia zhyvuchosti viisk u suchasnomu zbroinomu konflikti []. *Opir materialiv i teoriiia sporud. Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk.* Kyiv: KNUBA, 106, 282-295. DOI: 10.32347/2410-2547.2021.106.282-295. (in Ukrainian).
6. Wang, L., Kong, D. (2023). Study on Pressure Reconstruction Method of Explosion Shock Wave. *Journal of Applied Fluid Mechanics.* Vol. 16, No. 7, pp. 1442-1454. ISSN 1735-3572. DOI: 10.47176/JAFM.16.07.1690.
7. Faiza Mohamed, Zauba A., Aziz Al-Rawi, Ahmed El-Badawy Sayed, Abubaker M. Omer Barahim, Yasser R. Tawc. (2022). Investigation

### The effect of an explosive shock wave on the plate of a protective structure of a critical infrastructure

*Volodymyr Sakharov,  
Oleksandr Ilytvyn*

**Summary.** The article presents the outcomes of an analysis on the stress-strain conditions of reinforced concrete structures subjected to an explosive shock wave resulting from the detonation of a combat unit from a kamikaze drone against a protective screen. When designing protective structures for critical infrastructure, employing computer simulation enables an assessment of the genuine impact of explosive loading on the structural elements' strength. The active phase of explosive loading is exceptionally brief, lasting only a fraction of a second. Under such circumstances, modeling is best performed using explicit methods of direct integration in time.

The structure considered in this work is a reinforced concrete slab supported by a metal beam cage with I-beam cross-sections, topped with a sand backfill. The study was executed within the SIMULIA Abaqus software suite, incorporating models depicting nonlinear material behavior in a three-dimensional context. Discretely positioned reinforcement was considered for reinforced concrete structures, and the "Concrete Damage Plasticity" model was applied for concrete, accounting for damage accumulation. The devised computational scheme for the shelter represents a section of the protective structure's roof under conditions of cyclic symmetry.

The article elucidates the core principles of incorporating explosive loading according to algorithm CONWEP. The results demonstrate that during the detonation of a kamikaze drone, an explosive wave created a crater in the sand backfill, exposing the slab. The study illustrates the development of damage in the reinforced concrete slab at various time intervals. Despite the identified damage to the slab, the protective structure overall withstood the explosive load. The intensity of the explosive shock wave diminishes significantly as it propagates away from the explosion site.

**Key words.** Blast wave, explosive wave, TNT, protective structures, impulse, explicit method, critical infrastructure, soil, concrete.