

УДК 340:007 (623.126, 624)

doi:10.31650/2707-3068-2024-28-75-84

ПОРІВНЯННЯ МЕТОДИК ПРОНИКНЕННЯ ДІЇ ЗАСОБІВ ПОВІТРЯНОГО НАПАДУ ПРОТИВНИКА В ЗАЛІЗОБЕТОНІ КОНСТРУКЦІЇ СПОРУД ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Білик С.І., док. техн. наук, проф.,
vartist@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8783-5892

Білик А.С., канд., техн. наук, доцент,
artem.bilyk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9219-920X

*Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ,
управління інноваційних проєктів Центрального воєнно-наукового управління ГШ ЗСУ*

Анотація. На основі огляду літератури виявлено тенденції розвитку досліджень споруд інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури. Визначено і узагальнено проведені експериментальні і теоретичні дослідження залізобетонних захисних конструкцій. Оглянуто дослідження конструкцій із використанням різних матеріалів. Визначено, що одним із перспективних напрямків є використання багатошарових композитних конструкцій. Виконано огляд основних методик розрахунку проникнення бойових частин засобів повітряного нападу противника під час удару в захисні конструкції. Зроблено узагальнений висновок щодо використання модифікованої методики NDRC (США) для оцінки експериментальних досліджень.

Ключові слова: захисні споруди, залізобетонні конструкції, інженерний захист, проникнення, ракети, об'єкти критичної інфраструктури, Країна-фортеця.

Вступ. Збройна агресія РФ зумовила найбільший виклик для національної безпеки України за весь час з 1991 року. Внаслідок атак на території України вже уражено досить велику кількість **об'єктів критичної інфраструктури (ОКІ)** [1].

В 2022-2023 роках була розроблена і получила розвиток концепція «Країна-фортеця» [1], реалізація якої створює умови захисту виробничих, військових та інфраструктурних об'єктів України. Для втілення вказаної концепції необхідно розвивати та вирішувати нові наукові теоретичні, експериментальні і методологічні задачі, які виникають під час інженерно-технічного та наукового супроводу проєктування і будівництва захисних конструктивних систем [1, 2]. Виникнення таких задач обумовлені такими об'єктивними факторами:

1. Ураження агресором ОКІ ракетами, які відсутні на озброєнні України. Моделювання захисних споруд у разі прямого влучання ракетами з надзвуковою швидкістю в момент контакту, з подальшим вибухом бойової частини (БЧ) зі значною масою в тротиловому еквіваленті – це складна задача, приклади розрахунку якої зазвичай відсутні у відкритому доступі. Бойові характеристики засобів ураження агресора зазвичай також не є загальнодоступними [1, 2].

2. Відсутність сучасних нормативних положень щодо розрахунку захисних споруд ОКІ на ураження сучасними засобами агресора. Відсутність у відкритому доступі перевірених методик розрахунків влучання засобів повітряного нападу (ЗПН) при швидкостях 800-1100 м/с в момент контакту з цілью, яка має складну композитну структуру; перевірених методик розрахунків влучання ЗПН, які мають проникаючі БЧ.

3. Відсутність типових проєктів захисних споруд та норм із проєктування із узагальненими рекомендаціями щодо будівництва та експлуатації. Норми проєктування споруд цивільного захисту не підходять для проєктування споруд інженерного захисту ОКІ, так як вони мають різне функціональне призначення, технологію і фактори ураження,

головними з яких є удари, осколки, проникнення БЧ з подальшим вибухом вибухової речовини (ВР).

4. Можливість використання сталей високої міцності із реалізацією роботи на максимальні навантаження і впливи, та із урахуванням розвитку обмежених пластичних деформацій.

5. Необхідність підвищення живучості, вогнестійкості конструкцій [4, 5] при імпульсних і динамічних діях [3, 6]. Аналіз та уникнення обвалення поведінки захисної конструкції внаслідок прогресуючого руйнування, забезпечення живучості конструктивних систем [1, 4].

6. Можливість використання бетонів високих класів міцності, композитних сумішей, при захисті від ударних навантажень з проникненням всередину залізобетонної товщі.

7. Необхідність уточнення навантажень на будівельні конструкції у разі вибуху в стиснених умовах, у тому числі поряд і всередині захисної споруди. Уточнення коефіцієнтів затікання в залежності від конструктивних особливостей захисного коридору. Врахування можливого подальшого вдосконалення засобів повітряного нападу агресора.

8. Необхідність проведення експериментальних досліджень на моделях з наступним аналізом, створення та пристосування обладнання для фіксації частот коливань і переміщень будівельних конструкцій з точністю до 0,001 с, для фіксації часу вибуху і амплітуд коливань конструкцій до і після вибуху.

9. Розробка захисних конструкцій від дії БЧ безпілотних літаючих апаратів (БпЛА).

Аналіз основних джерел. До фортифікаційних, інженерних захисних споруд, та споруд цивільного захисту – висуваються різні вимоги, та застосовуються різні підходи у проектуванні. Послідовність збільшення вимог до захисних споруд тісно пов'язані із удосконаленням факторів ураження. Так для захисту інфраструктурних та військових об'єктів, починаючи з першої світової війни, стали широко використовувати сталь та залізобетон з метою захисту від ураження артилерійськими снарядами. Друга світова війна додала до переліку небезпечних факторів авіабомби, а «холодна» війна – загрози, пов'язані із ядерною зброєю. Широкомасштабна війна РФ, яка ведеться наразі проти України, засвідчила появу нових, раніше не врахованих загроз для споруд від високоточних ЗПН противника, зокрема ракет та БпЛА. Це призводить до розширення сценаріїв загроз, навантажень і впливів на будівлі і споруди. Аналіз досліджень вказує на необхідність узагальнення класифікації силових дій від сучасних факторів ураження для споруд з урахуванням воєнного стану з різними характеристиками і наслідками.

Потенційні антропогенні фактори ураження воєнного часу, які впливають на захисні споруди, можна розділити за основним впливом на:

- 1) кінетичні,
- 2) вибухові,
- 3) температурні,
- 4) осколкові,
- 5) кумулятивні,
- 6) ударні ядра,
- 7) хімічні,
- 8) електромагнітні,
- 9) комбіновані,
- 10) непрямі і вторинні ефекти.

В будівельних нормах (ДБН В.1.2-14) і у постановах (№471 постанова КМУ) закладена концепція одиничної живучості, що в даному випадку пов'язана із ефективністю систем протиповітряного прикриття ОКІ [1, 4], ремонтпридатністю захисних споруд, вчасністю та оперативністю проведення ремонтних робіт після влучань.

Дія різних типів ЗПН на споруду відрізняється фізикою утворення динамічного навантаження, часом ударного імпульсу, спектром наслідків пошкоджень цілі тощо. Важливими факторами, які характеризують ударні і вибухові дії від ЗПН є вага, швидкість в

момент контакту, характеристики БЧ, кут влучання. На опір проникненню ЗПН всередину захисної конструкції або вибухової хвилі впливають такі характеристики захисної споруди як її густина, конструкція і міцність матеріалів, умови обпирання, взаємодії з іншими конструкціями комплексної системи захисту тощо. Згідно концепції «Країна-фортеця» введено три рівня захисту ОКІ. Захисні інженерні споруди другого рівня повинні витримувати пряме влучання БпЛА, а третього рівня – прямі влучання ракет.

Ударна взаємодія ЗПН і захисної споруди характеризується глибиною і часом проникнення, відповідно імпульсом динамічного навантаження, деформаціями самого ЗПН, деформаціями і руйнуванням захисної споруди. Задача проникнення ЗПН актуальна для проникних БЧ із затримкою вибуху для спричинення більших руйнувань для захищених об'єктів.

Удар ЗПН призводить як до локального пошкодження захисної споруди, проникнення в середину конструкції на певну величину, так і до загальної динамічної реакції захисної споруди. Також коефіцієнт динамічності самого ЗПН достатньо значний, і тому момент вибуху, проникнення ЗПН всередину захисної конструкції та деформація ЗПН є пов'язані між собою події у часі.

Для ракет і БпЛА, на відміну від артилерійських снарядів, ключове значення для проникнення у захисну товщу споруди, має конструкція БЧ. Проникні типи БЧ мають як правило потовщені стінки із твердих, сталевих і титанових сплавів, оживальну або наближену до неї форму оболонки. Також для збільшення глибини проникнення можуть застосовуватися спеціальні реактивні прискорювані руху БЧ ЗПН всередині товщі, та форвардні кумулятивні додаткові заряди і ударні ядра (дуpletні БЧ) тощо.

Аналіз результатів досліджень різних авторів свідчить про те, що серед 20 методик розрахунку на удар з проникненням в залізобетонну конструкцію виділяють 3-4 методики, які дають достовірний результат.

Важливим є проведення досліджень з новими характеристиками композитного бетону [11-14]. Так в роботі [11] наведено результати експериментального дослідження ударостійкості бетону з межею міцності на стиск 45–235 МПа при ударі 12,6-мм круглого снаряда зі швидкостями в діапазоні від ~620 до 700 м/с. Результати показують, що глибина проникнення та діаметр воронки демонструють загальне зменшення в цільових зразках зі збільшенням міцності бетону на стиск. Однак тенденція не є лінійною. Наявність крупних фракцій гранітних заповнювачів виявляється корисною з точки зору зменшення глибини проникнення, діаметра воронки та поширення тріщин, що сприяє підвищенню ударостійкості. Введення сталевих волокон (фібри) у бетон зменшує діаметр воронки та поширення тріщин, але не мало істотного впливу на глибину проникнення. Підвищення температури затвердіння з 30°C до 250°C не змінило суттєво ударостійкість бетону. Виходячи з поточних висновків і розгляду вартості, високоміцний фібробетон з міцністю на стиск ~100 МПа виявляється найбільш ефективним для захисту від удару снарядів.

Також важливими є дослідження у напрямку удосконалення конструктивних рішень багатошарових систем захисту [12] для досягнення максимального опору/розсіювання енергії. Досліджена багатошарова конструкція включає шари залізобетону, валуни, шар еластомеру, бетонну панель із надвисокими характеристиками та шар сталевих пластин. Загалом було розглянуто шість різних конфігурацій, щоб отримати найбільш ефективну конструкцію захисту. Оптимізація запропонованих конфігурацій була виконана шляхом використання понять питомого поглинання енергії та ударного опору. Крім того, також вивчені характеристики пошкодження та руйнування кожної конфігурації. Спостерігається пластичне розширення отворів у шарі піщаного ґрунту, фрагментаційне руйнування валунів, пелюсткове руйнування сталевих пластин та відколювання бетонного шару. На основі підходів до конкретного поглинання енергії та ударного опору пропонується оптимальна послідовність укладання кожного матеріалу для зниження балістичного впливу.

Важливими є дослідження композитних сумішей бетону при ураженні ЗПН зі швидкістю до 1300 м/с із подальшим вибухом [13]. Також проведені дослідження, які дали

змогу показати взаємозв'язок між глибиною проникнення кулі і її деформативністю [14] при проникненні у фібробетонну плиту.

Основний матеріал досліджень. Розглянуто основні методики розрахунку захисних залізобетонних захисних конструкцій на ударні навантаження від ЗПН. Ряд досліджень присвячені захисту від осколків мають обмежене використання. Ряд методик відносяться тільки до визначення проникнення суцільного снаряду, а ще ряд методик можна використовувати при обмеженій швидкості і ваги ракети або снаряду. Всі методики призначені для дослідження без урахування пружної основи, це захисні конструкції споруд, які захищають людей та обладнання. Тому в методиках приводяться рекомендації по розрахунку максимальної глибини проникнення або пробиття, а також рекомендації по призначенню розрахункової проектною товщини захисної залізобетонної конструкції з урахуванням відколювання (відлущення поверхневого шару бетону з протилежної від фронтальної поверхні – поверхні конструкції яка сприймає удар) захисного шару бетону з протилежного поверхні від зовнішньої поверхні, яка сприймає контакт удару. Удар снаряду наноситься із зовнішньої сторони конструкцій, при цьому із середини конструкція не має додаткової основи для гасіння динамічної складової, та погашення уламків відколювання. Тому в багатьох дослідженнях пропонується вплив уламків відколювання при ударі зменшувати за рахунок збільшення товщини захисної конструкції, або встановлювати спеціальний противідколюний шар.

Огляд досліджень показав, що в основі формул із визначення проникнення снаряду у тіло захисної конструкції використовують емпіричну модель, побудовану на характеристиках аналітичної моделі та експериментальних даних. Експериментальні дані, як свідчать результати досліджень, отримані шляхом статистичної обробки експериментальних даних і аналітично зв'язані із фізичними законами, які описуються теорією пружності, опору матеріалів, теорією руйнування, теорією міцності будівельних конструкцій.

Для систематизації різних формул введені позначення параметрів та характеристик ударного навантаження. До основних характеристик ударного навантаження відносять такі:

$x_C = z_C$ – глибина проникнення, e – межа перфорації, h_s – межа утворення відколювання, максимальна проектна товщина конструкції, $m = M$ – маса ракети, d – діаметр ЗПН, V_0 – швидкість ЗПН, H_0 – товщина цілі, N, N_h – коефіцієнт форми носової частини ЗПН, K_P – коефіцієнт проникнення бетону, A_p – тиск на секцію ракети, f_C – розрахункова максимальна міцність бетону на стиск, $f_t = f_{cd}$ – максимальна міцність бетону на розтяг, E_s – модуль пружності матеріалу БЧ ЗПН, E_{st} – модуль пружності сталі, G – функція, що представляє удар.

Методики, які наразі застосовуються (ПФ 43, атомні, UFC, лфті) розглянуті раніше [1]. Нижче розглянемо чотири поширені методики розрахунків для проникнення ЗПН.

Методика 1. Формула проникнення Петрі (Petri). Формула Петрі розроблена у 1910 році. Формула потім була модифікована для різних залізобетонних захисних конструкцій, достатньо популярна для розрахунку глибини проникнення снаряду із умови, що висота захисної конструкції значна і достатня для виконання захисту [7-9]. Дослідження з модифікованої формули Петрі були представлені в Чикаго, Іллінойс 11-14 жовтня 1950 р. на зустрічі Американського товариства інженерів-будівельників. Відповідно до методики, існує три основні чинники, що визначають проникнення ЗПН в ціль: 1. Швидкість ЗПН при ударі, 2. Фізичні властивості ЗПН, та 3. Характеристика матеріалу цілі. Ці фактори були об'єднані, щоб отримати емпіричне вираження для проникнення ЗПН з найбільш характерними балістичними характеристиками. Модифікована формула Петрі виражається як:

$$z_C = D_C = kA_p V^*$$

(1)

де D_C – глибина (у футах) проникнення, k – експериментально отриманий коефіцієнт проникнення матеріалу (див. таблицю 1), A_p – поперечний тиск, отриманий діленням ваги P ракети на її максимальну площу поперечного перетину (виражену як фунти ваги на квадратний фут), а V^* – коефіцієнт швидкості, який, у свою чергу, визначається виразом

$$V^* = \log\left(1 + \frac{v_0^2}{215000}\right) \quad (2)$$

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта проникнення (k) для різних матеріалів [8]

Матеріал	k – експериментально отриманий коефіцієнт проникнення матеріалу $\text{ft}^3 \text{lb}^{-1}$ (фунт ³ /фут)
Вапняк	$5,38 \times 10^{-3}$
Бетон. Маса бетону з міцністю на роздавлювання 2200 фунтів на квадратний дюйм	$7,99 \times 10^{-3}$
Звичайний залізобетон з міцністю на роздавлювання 3200 фунтів на квадрат	$4,76 \times 10^{-3}$
Спеціально армований залізобетон з міцністю на роздавлювання 5700 фунтів на квадратний дюйм і 1,4 відсотка арматури.	$2,82 \times 10^{-3}$ Іноді вказується значення $2,84 \times 10^{-3}$ [5]
Кам'яна кладка	$11,72 \times 10^{-3}$
Цегляна кладка	$20,48 \times 10^{-3}$
Піщаний ґрунт	$36,7 \times 10^{-3}$
Ґрунт з рослинністю	$48,2 \times 10^{-3}$
М'який ґрунт	$73,2 \times 10^{-3}$

В американських системах одиниць вимірювання використовують модифіковану формулу [7-9]:

$$z_C = 12K_p \log\left(1 + \frac{v_0^2}{215000}\right) \quad (3)$$

В системі одиниць СІ модифікована формула Петрі має запис [7-9]:

$$\frac{z_C}{d_{rk}} = K_p \frac{M}{d_{rk}^3} \log\left(1 + \frac{v_0^2}{19974}\right)$$

У формулі рекомендовано приймати $K_p = 6.36 \times 10^{-4}$ – для бетонної захисної конструкції, $K_p = 3.39 \times 10^{-4}$ – для звичайної залізобетонної конструкції, для спеціального бетону $K_p = 2.26 \times 10^{-4}$. Для захисних залізобетонних конструкцій, без обпирання на розподільчу ґрунтову основу

товщину перфорації рекомендовано прийняти $e = 2z_C$, а з урахуванням відколювання товщину захисної конструкції рекомендовано приймати $s = 2,2z_C$. Такі залежності і приймають за модифіковану формулу Petri.

Методика 2. Формула лабораторії балістичних досліджень, BRL. Необхідність врахування міцності бетону призвела до проведення додаткових досліджень [8,9], які виконала Лабораторія балістичних досліджень (Ballistic Research Laboratory, США), була розроблена для розрахунку глибини проникнення в бетон твердого снаряду. У загальному виді

формулу слід використовувати з урахуванням уточнених властивостей бетону і матеріалу снаряду через коефіцієнт $k_{perf}=0,00133$ при вимірюванні у американських системах одиниць

$$x_C = z_C = \frac{k_{perf} M}{\sqrt{f_C} d^{2,8}} (V_0)^{1,33}$$

(4)

Відповідно глибину перфорації і товщину захисної конструкції з урахуванням відколювання рекомендовано приймати за такими співвідношеннями для захисної залізобетонної конструкції без додаткових розподільчих шарів:

$$\frac{e_C}{d} = 1,3 \frac{z_C}{d}; \quad \frac{h_s}{d} = 2,0 \frac{z_C}{d}$$

Методика 3. Формула інженерів Корпусу армії США (Army Corps of Engineers, ACE). У 1946 році ACE була запропонована формула [8, 9]:

$$\frac{z_C}{d} = \frac{282}{\sqrt{f_C}} \frac{M}{d^3} d^{0,215} \left(\frac{V_0}{1000} \right)^{1,5} + 0,5$$

(5)

Дослідження базувались на випробуваннях залізобетонних конструкцій при влучанні сталевих снарядів діаметром 37 мм, 75 мм, 155 мм. Відповідно, для захисної залізобетонної конструкції без додаткових розподільчих шарів, глибину перфорації і товщину захисної конструкції з урахуванням відколювання рекомендовано приймати за такими співвідношеннями:

$$\frac{h_s}{d} = 2,12 + 1,36 \frac{z_C}{d}; \quad \left(3 \leq \frac{h_s}{d} \leq 18 \right)$$

$$\frac{e_C}{d} = 1,32 + 1,24 \frac{z_C}{d}; \quad \left(3 \leq \frac{e_C}{d} \leq 18 \right)$$

Проте дана формула не враховує форму носа БЧ ЗПН, властивості і деформативність її матеріалу, композитність та багатошаровість захисної конструкції. Також для сучасних ЗПН характерні високі швидкості при зіткненні з ціллю, які перевищують швидкість звуку.

Методика 4. Модифікована формула NDRC, Modified National Defense Research Committee Formula. Найбільшого поширення набула формула, розроблена Національним оборонним дослідницьким комітетом (NDRC) США [7] на основі формул ACE [7, 8]. При моделюванні роботи системи «ракета-захисна споруда» в дослідженнях встановлено, що контактна сила зростає лінійно до постійного максимального значення, коли глибина проникнення мала. Новим є введення параметра форми БЧ ЗПН, який для плоскої циліндричної форми: $N = 0,72$; для тупої форми $N = 0,84$; напівсферичної $N = 1,0$; і дуже для гострого носа БЧ ракети відповідно $N = 1,14$. В метричних одиницях США маємо:

$$\frac{z_C}{d} = \begin{cases} 2\sqrt{G} & G = 3,8 \times 10^{-5} \frac{NM}{d\sqrt{f_C}} \left(\frac{V_0}{d} \right)^{1,8} \quad \text{при } G \geq 1, \\ G + 1, & \text{при } G \leq 1; \end{cases}$$

(6)

Методика 5. Модифікована формула NDRC [10]. Дана формула була отримана на підставі обробки експериментальних даних математичними методами статистики, були враховані розміри та матеріал БЧ через модулі Юнга відносно модуля деформації сталі. Якщо БЧ із сталі, ця формула ідентична формулі NDRC (6):

$$\frac{z_C}{d} = \begin{cases} 2\sqrt{G}, -G = 3,8 \times 10^{-5} \left(\frac{E}{E_s} \right)^{1,25} \frac{NM}{d\sqrt{(f_C)}} \left(\frac{V_0}{d} \right)^{1,8}, \text{ при } G \geq 1, \\ G + 1, \quad \text{при } G \leq 1; \quad \frac{z_C}{d} \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

Характеристики захисних залізобетонних плит слід приймати з урахуванням величин проникнення та утворення зони відколювання зворотної поверхні захисної конструкції:

$$\begin{aligned} e_C - a &= 1,32d + 1,36z_C \quad \text{для } 1,35 \leq \frac{z_C}{d} \leq 13,5 \\ \frac{e_C - a_c}{d} &= 3,19 \left(\frac{z_C}{d} \right) - 0,718 \left(\frac{z_C}{d} \right)^2 \quad \text{для } 1,35 \leq \frac{z_C}{d} \leq 13,5 \\ (h_s - a_c)b_c &= 2,12d + 1,36z_C \quad \text{для } 0,65 \leq \frac{z_C}{d} \leq 11,75; \quad b_c = \left(\frac{E}{E_s} \right)^{0,2} \\ \frac{(h_s - a_c)b_c}{d} &= 7,19 - 5,06 \left(\frac{z_C}{d} \right)^2 \quad \text{для } \frac{z_C}{d} \leq 0,65. \end{aligned} \quad (8)$$

Для одиниць системи США, запис відрізняється коефіцієнтами.

$$\frac{z_C}{d} = \begin{cases} 2\sqrt{G} \quad G = 180 \left(\frac{E}{E_s} \right)^{1,25} \frac{NM}{\sqrt{(f_C)}} \left(\frac{V_0}{1000d} \right)^{1,8} \quad \text{при } G \geq 1, \\ G + 1, \quad \text{при } G \leq 1; \quad \frac{z_C}{d} \leq 1. \end{cases}$$

Висновки. Проаналізовано різні методики розрахунку глибини проникнення ЗПН в залізобетонну товщу захисної конструкції. В статті представлені методики, які більш повно відображають фізико-механічні характеристики взаємодії захисних залізобетонних плит споруд і ЗПН. Ці методики історично зв'язані між собою і враховують велику базу експериментальних досліджень. На основі них, узагальнено критерії проникнення можна записати так:

$$\begin{aligned} \frac{z_C}{d} &= K_{pn} N \left(\frac{E}{E_s} \right)^n \frac{M}{d^3} \left(\frac{V_0}{d} \right)^m \frac{d^2}{\sqrt{(f_{C,pr})}}; \\ \frac{z_C}{d} &= K_{pn} N \left(\frac{E}{E_s} \right)^n \frac{M}{d \sqrt{(f_{C,pr})}} \left(\frac{V_0}{d} \right)^m. \end{aligned} \quad (9)$$

Представлений підхід дозволяє використовувати експериментальні дані під час випробувань на проникнення різних композитних матеріалів з урахуванням міцності як захисної конструкції так і БЧ ЗПН. Також є можливість в подальшому оцінити результати числових досліджень моделей з різними фізико-механічними характеристиками матеріалів БЧ ЗПН і захисної споруди.

Література:

1. Організаційно-технічні засади побудови системи інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури енергетичної галузі України Білик А.С. / Коваль М.В., Коваль В.В., Коцюрба В.І., Білик А.С. // Наука і оборона /2023
2. Зброя Російсько-української війни 2022-2023 років: довідник каталог основних зразків озброєння та військової техніки, які застосовувались протиборчими сторонами під час відсічі широкомасштабного вторгнення РФ в Україну (24.02.2022 –30.06.2023) /Міністерство оборони України, апарат Головнокомандуючого Збройних Сил України Генеральний штаб Збройних Сил України, Центр дослідження воєнної історії Збройних Сил України – Київ: Видавництво Ліра,2023-К, 2023.
3. Shugaylo O. P., Bilyk S.I. Research of the stress-strain state for steel supportstructures of nuclear power plant components under seismic loads. Nuclear and Radiation Safety. 2022. № 3(95). С. 15-26. [https://doi.org/10.32918/nrs.2022.3\(95\).02](https://doi.org/10.32918/nrs.2022.3(95).02).
4. Bilyk S.I., Tonkacheiev H.M., Bilyk A.S., Tonkacheiev V.H. Tall von-Mises trusses' skew-symmetric deformation // Strength of Materials and Theory of Structures. – Kyiv: KNUBA, 2020. – Issue 105. – P. 114-126. DOI: 10.32347/2410-2547.2020.105.114-126. (
5. Mykhailo Daurov, Artem Bilyk. Investigation of changes in steel frames stress state in fire and influence on its vitality// Strength of materials and theory of structures. 2022. Issue. 108. pp.325-336. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.108.325-336>
6. Bilyk S. Determination of changes in thermal stress state of steel beams in LIRA-SAPR software. /Bilyk S., Bashynska O., Bashynskyi O. //Strength of materials and theory of structures. 2022. Issue. 108. pp.189-202. <https://doi.org/10.32347/2410-547.2022.108.189-202>.
7. NDRC. Effects of impact and explosion. Summary Technical Report Division 2, 1, National Defence Research Committee, Washington, DC, 1946. <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/AD0221586.pdf>
8. Amirikian A, 1950. Design of protective structures. Report NT-3726, Bureau of Yards and Docks, Department of the Navy.
9. Kennedy, R.P. A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects. Nucl. Eng. Design, 1976, 37, 183-203. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(76\)90015-7](https://doi.org/10.1016/0029-5493(76)90015-7)
10. Kar, A.K. (1978) Local Effects of Tornado-Generated Missiles. Journal of the Structural Division, 104, 809-816. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JSDEAG.0004915>
11. Zhang a, V.P.W. Shim b, G. Lu a, C.W. Chew a Resistance of high-strength concrete to projectile impact International Journal of Impact Engineeringhttps: Volume 31, Issue 7, August 2005, Pages 825-841//doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2004.04.009
12. Shashwat Kapoor a 1, Sonalisa Ray a 2, Jagdish Prasad Sahoo b 2, Yugal Kishor Joshi c 3 Optimization of multi-layered composites against ballistic impact: A mesoscale approach Composite Structures. Volume 338, 15 June 2024, 118097 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822324002253>
13. Jianzhong Lai, Jiehang Zhou, Xuexiang Yin, Xiaobo Zheng Dynamic behavior of functional graded cementitious composite under the coupling of high speed penetration and explosion Composite Structures. Volume 274, 15 October 2021, 114326. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114326>
14. Anna L. Mina Michael F. Petrou Konstantinos G. Trezos Resistance of an Optimized Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete to Projectile Impact Buildings. Building Materials, and Repair & Renovation 2021, 11(2), 63; <https://doi.org/10.3390/buildings11020063>

References

- [1] Orhanizatsiyno-tekhnichni zasady pobudovy systemy inzhenernoho zakhystu ob'yektiv krytychnoyi infrastruktury enerhetychnoyi haluzi Ukrayiny / Koval' M.V., Koval' V.V., Kotsyuruba V.I., Bilyk A.S. // Nauka i oborona /2023
- [2] Zbroya Rosiys'ko-ukrayins'koyi viyny 2022-2023 rokiv: dovidnyk katalog osnovnykh zrazkiv ozbroynnya ta viys'kovoyi tekhniky, yaki zastosovuvalys' protyborchymy storonamy pid chas vidsichi shyrokomasshtabnoho vtorhnennya rf v Ukrainu (24.02.202 –30.06.2023) /Ministerstvo obrony Ukrayiny, aparat Holovnokomanduyuchoho Zbroynykh Syl Ukrayiny Heneral'nyy shtab Zbroynykh Syl Ukrayiny, Tsentr doslidzhennya voyennoyi istoriyi Zbroynykh Syl Ukrayiny – Kyiv: Vydavnytstvo Lira,2023-K, 2023.
- [3] Shugaylo O-r P., Bilyk S.I. Research of the stress-strain state for steel supportstructures of nuclear power plant components under seismic loads. Nuclear andRadiation Safety. 2022. № 3(95). C. 15-26. [https://doi.org/10.32918/nrs.2022.3\(95\).02](https://doi.org/10.32918/nrs.2022.3(95).02).
- [4] Bilyk S.I., Tonkacheiev H.M., Bilyk A.S., Tonkacheiev V.H. Tall von-Mises trusses' skew-symmetric deformation // Strength of Materials and Theory of Structures. – Kyiv: KNUBA, 2020. – Issue 105. – P. 114-126. DOI: 10.32347/2410-2547.2020.105.114-126.
- [5] Mykhailo Daurov, Artem Bilyk. Investigation of changes in steel frames stress state in fire and influence on its vitality// Strength of materials and theory of structures. 2022. Issue. 108. pp.325-336. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.108.325-336>.
- [6] Bilyk S. Determination of changes inthermal stress state of steel beams in LIRA-SAPR software. /Bilyk S., Bashynska O., Bashynskyi O. //Strength of materials and theory of structures. 2022. Issue. 108. pp.189-202. <https://doi.org/10.32347/2410-547.2022.108.189- 202> .
- [7] NDRC. Effects of impact and explosion. Summary Technical Report Division 2, 1, National Defence Research Committee, Washington, DC, 1946. <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/AD0221586.pdf>
- [8] Amirikian A, 1950. Design of protective structures. Report NT-3726, Bureau of Yards and Docks, Department of the Navy. <https://www.osti.gov/servlets/purl/4390750>.
- [9] Kennedy, R.P. A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects. Nucl. Eng. Design, 1976, 37, 183-203. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(76\)90015-7](https://doi.org/10.1016/0029-5493(76)90015-7)
- [10] Kar, A.K. (1978) Local Effects of Tornado-Generated Missiles. Journal of the Structural Division, 104, 809-816. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JSDEAG.0004915>.
- [11] Zhang a, V.P.W. Shim b, G. Lu a, C.W. Chew a Resistance of high-strength concrete to projectile impact International Journal of Impact Engineeringhttps: Volume 31, Issue 7, August 2005, Pages 825-841//doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2004.04.009.
- [12] Shashwat Kapoor a 1, Sonalisa Ray a 2, Jagdish Prasad Sahoo b 2, Yugal Kishor Joshi c 3 Optimization of multi-layered composites against ballistic impact: A mesoscale approach Composite Structures. Volume 338, 15 June 2024, 118097. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822324002253>.
- [13] Jianzhong Lai, Jiehang Zhou, Xuexiang Yin, Xiaobo ZhengDynamic behavior of functional graded cementitious composite under the coupling of high speed penetration and explosionComposite Structures. Volume 274, 15 October 2021, 114326. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114326>.
- [14] Anna L. Mina Michael F. Petrou Konstantinos G. Trezos Resistance of an Optimized Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete to Projectile ImpactBuildings. Building Materials, and Repair & Renovation 2021, 11(2), 63. <https://doi.org/10.3390/buildings11020063>.

COMPARISON OF THE METHODS OF PENETRATION OF THE ENEMY'S AIR ATTACK MEANS IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES OF CRITICAL INFRASTRUCTURE FACILITIES PROTECTION

Bilyk S.I., ScD, Professor,
vartist@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8783-5892

Bilyk A.S., PhD, Associated Professor,
artem.bilyk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9219-920X

*Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv,
Office of Innovative Projects of the Central Military-Scientific Department of the General Staff of
the Armed Forces of Ukraine*

Abstract. On the basis of the literature review, trends in the development of studies of engineering protection of critical infrastructure objects were revealed. The review of scientific works revealed the direction of improving the physical and mechanical properties of building protective structures. It is noted that large-scale experimental and theoretical studies of reinforced concrete structures and reinforced concrete protective plates with the use of fiber were carried out. Experimental and theoretical studies of reinforced concrete protective structures on the impact of rockets and the subsequent explosion have been identified and summarized. The study of structures using different materials is shown. It was determined that one of the promising directions is the use of multilayer composite structures. The results of experimental studies by various authors were analyzed and it was concluded that air damage impacts should be classified into 4 categories: an impact, a soft impact, a hard impact of a projectile with a steel shell; a semi-solid impact is the impact of a missile whose outer shell is made of a composite material or a thin-walled titanium alloy. The authors also draw attention to the possibility of studying an all-plastic impact - the impact of a concrete-piercing warhead of a missile with a 20-22 mm titanium body, the impact is accompanied by the development of plastic deformations in the shell during penetration into the composite reinforced concrete layer. An overview of the main methods of calculating the penetration of combat units during an impact on defensive structures was carried out. The formulas of the main methods are based on the results of experimental and theoretical studies NDRC. Effects of impact and explosion. Summary Technical Report Division 2, 1, National Defense Research Committee, Washington, DC, 1946". A generalized conclusion is made regarding the use of the modified NDRC (USA) method for evaluating experimental studies.

Keywords: defensive structures, reinforced concrete structures, engineering protection, penetration, missiles, critical infrastructure facilities, Fortress Country.