

Захист об'єктів критичної інфраструктури України від прямих влучань ракет за допомогою підземного розташування

- **Коцюруба Володимир Іванович**, д-р техн. наук, проф., заслужений винахідник України
Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6565-9576>
- **Білик Артем Сергійович**, канд. техн. наук, доц.
Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9219-920X>
- **Бзот Володимир Броніславович**, канд. техн. наук, старш. наук. співробітник
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5804-1161>
- **Дзевєрін Ігор Григорійович**, канд. військ. наук, старш. наук. співробітник
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4121-2099>

У статті аналізуються основні загрози ураження вітчизняної критичної інфраструктури крилатими та аеробалістичними ракетами РФ. Зібрано відомі характеристики основних ракет противника, а також проведено наближені обчислення їх специфічних параметрів.

Наведено методику розрахунку захисних товщ підземних укриттів об'єктів критичної інфраструктури, а також їх компоновальні схеми за повного і часткового заглиблення та у разі поверхневого укриття.

На підставі аналізу розрахункових даних показано доцільність заглибленого розташування головних елементів об'єктів критичної інфраструктури в енергетиці, зокрема розподільчих підстанцій тощо.

Наведено геометричні розміри укриттів залежно від параметрів ґрунтового середовища.

Стаття входить до циклу публікацій авторів щодо розробленої ними концепції «Країна-фортеця», реалізація якої спрямована на забезпечення інтегрального захисту території України, об'єктів, громадян та систем.

Ключові слова: вибух, інженерний захист, об'єкти критичної інфраструктури, підземні споруди, прями влучання, ракети, російська агресія, удар, ураження, фортифікація.

© Коцюруба В. І., Білик А. С., Бзот В. Б., Дзевєрін І. Г., 2023

Вступ

Широкомасштабна збройна агресія російської федерації, яка триває досі проти України, становить найбільшу загрозу для національної безпеки України за весь час її незалежності [1]. Саме тому постає актуальне питання відбудови і модернізації країни з метою максимального збереження ключових функцій в умовах перманентних воєнних загроз, головною з яких є ракетні удари по об'єктах критичної інфраструктури (ОКІ) [2]. Авторами розроблено кон-

цепцію «Країна-фортеця», реалізація якої спрямована на забезпечення інтегрального захисту території України, національних інтересів, громад, спільнот, об'єктів, громадян та систем [3]. У практичній площині це означає, насамперед, стійкість систем державного та воєнного управління, життєзабезпечення, укриття ОКІ, цивільний захист, безпеку міського середовища тощо. Щодо інженерного захисту концепцією передбачено передусім захист ОКІ. Суттєві можливості ракет РФ з ураження ОКІ зумовлюють те, що найбільш ефективним способом їх інженерного захисту є заглиблене розташування цих об'єктів [4].

Мета статті

Метою статті є визначення характеристик та навантажень на ОКИ в разі ракетного ураження, розрахувати компоновку заглибленого розташування захисних споруд та показати такий захист на прикладі об'єкта.

Тактико-технічні характеристики ракет рф

Основними засобами ураження ОКИ, розташованих практично на всій території держави, є крилаті та аеробалістичні ракети повітряного, наземного та морського базування, а також авіаційні ракети і ударні безпілотні літальні апарати (БпЛА). Ударні БпЛА в цій статті не розглядаються, оскільки розглянуті авторами в [3]; також швидкість, маса бойової частини (БЧ) БпЛА, які використовуються рф, значно поступаються бойовим можливостям ракетного озброєння. Інші співмірні ракетним загрози, такі як керовані авіаційні бомби – також не розглядаються через їх малу ефективну дальність застосування. Очевидно, що розміщення споруд ОКИ поблизу державного кордону або лінії зіткнення із противником не є доцільним.

Засоби ракетного озброєння, які використовує рф у війні проти України, налічують декілька десятків типів. У цій статті розглядаються найбільш небезпечні та далекобійні ракетні комплекси. Зокрема, 23 листопада 2022 року рф випустила по території України близько 70 ракет Х-101/Х-555,

«Калібр» [5]. 5 грудня 2022 року рф випустила по території України близько 70 ракет Х-101/Х-555 та Х-59, з яких приблизно 60 було знищено силами та засобами протиповітряної оборони. Це стало 8-м масованим ударом по вітчизняній інфраструктурі [6]. Основні характеристики бойових ракет рф можна знайти у відкритих джерелах [7], водночас їх специфічні параметри – допоки невідомі. Наявні з відкритих джерел дані щодо ракет рф, якими атакують ОКИ в Україні, зведено в таблиці 1.

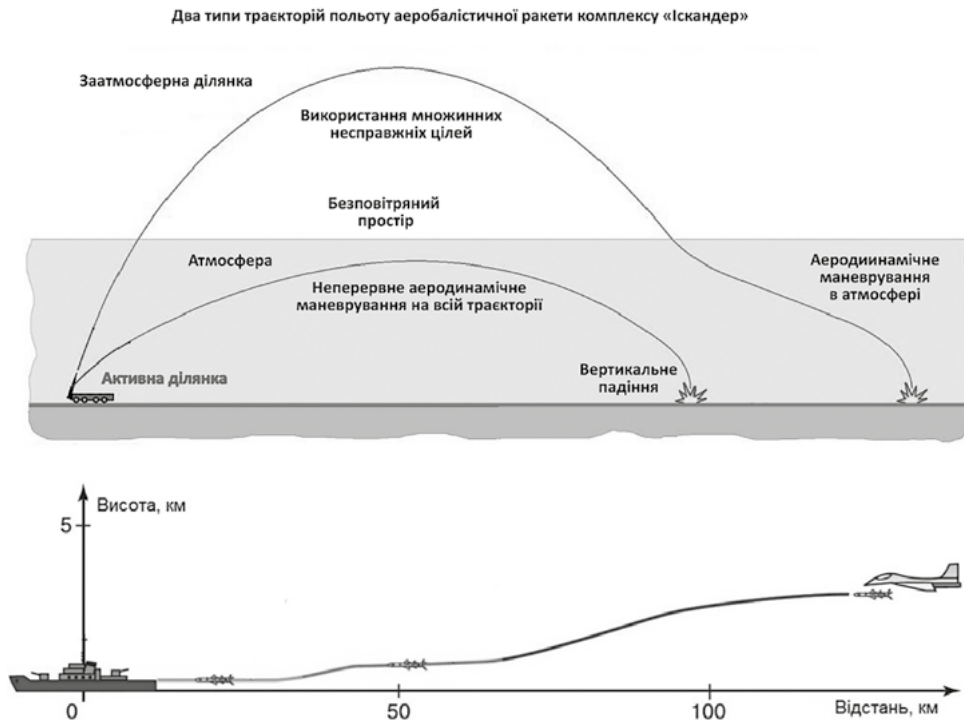
Так, тип і маса вибухової речовини (ВР) у БЧ – відомі допоки точно тільки для ракети «Точка-У» (162,5 кг, 20 % тротилу і 80 % гексогену, гексоліт ТГ20) і для Х-22: 630 кг, тип ВР ТГАГ-5 [8]. На підставі цих даних, а також компоновальних обмежень [9], для інших ракет спрогнозовано, що маса ВР складає орієнтовно 65 % від маси БЧ. Кут зустрічі з об'єктом ураження відомий тільки для комплексів «Точка-У» та «Іскандер», і становить приблизно 90° [10]. Для інших ракет із довідкової літератури може бути прийнято кут ураження до 80° включно (рисунок 1).

З аналізу відкритих джерел [11] встановлено, що тип ураження оперативно-тактичної ракети 9К79 комплексу «Точка-У» (підрив осколково-фугасної БЧ типу 9Н123Ф зосередженої дії, який для більшої ефективності проводиться на висотах близько 10...20 метрів) – відрізняється від інших ракет, які розглядаються. Ракета комплексу «Іскандер» має такі типи БЧ: осколково-фугасна, фугасно-запальна та проникаюча, яка має підвищену міцність для пробивання перекриттів та підривається із затримкою, після проникнення

Таблиця 1 - Основні характеристики ракет рф, якими атакуються ОКИ

Тип ракети	Довжина, м	Діаметр, м	Вага БЧ, кг	Максимальна шв., м/с	Точність КІВ, м	Стартова маса, кг
9К79 «Точка-У»	6,4	0,65	482	1100	50-250	2010
Х-59	5,7	0,4	310	291,67	2-5	900
Х-22	11,7	0,94	960	1111,11	200	5780
9М723 «Іскандер»	7,3	0,92	480	2450,00	10	3800
Х-55/Х-555	6,04	0,77	450	260,00	20	1500
ЗМ-14К/Т «Калібр»	8,2	0,514	450	240	2-4	1320
Х-47 «Кинджал»	7,7	0,9	500	4080	1	4615
Х-101	7,5	0,74	430	200,00	10	2400
П-800 «Онікс»	8,9	0,67	300	884	10	3900
Х-35	4,4	0,42	145	280	4-8	670

Примітка: КІВ – кругове імовірне відхилення.



a)

b)

Рисунок 1 – Траєкторія ракет: аеробалістична типу «земля-земля» 9М723 (9М729) комплексу «Іскандер», а) [11]; «повітря-земля» (б)

всередину цілі. Для надзвукової крилатої протикорабельної ракети повітряного базування Х-22 відома дія – фугасно-кумулятивна з БЧ 9А-22. Високоточна авіаційна ракета класу «повітря-поверхня» має варіант БЧ проникної дії. Стратегічні авіаційні крилаті ракети Х-55/Х-555 мають фугасні варіанти БЧ. Ракети «Калібр» у штатній комплектації ЗМ-14К/ЗМ-14Т (ЗМ-14КЭ/ЗМ-14ТЭ) оснащені БЧ фугасної дії. Гіперзвукова авіаційна ракета Х-47М2 «Кинджал» також оснащена БЧ фугасної дії. У стратегічній крилатій ракеті типу «повітря-поверхня» Х-101 може використовуватися осколково-фугасна, проникаюча та об'ємно-детонуюча БЧ. Надзвукова універсальна протикорабельна ракета середнього радіусу дії П-800 «Онікс» може бути оснащена фугасною і проникною БЧ [8], у ракети Х-35У БЧ – проникаючий фугас. Тому надалі ракети «Точка-У» не розглядаються, оскільки не мають варіантів БЧ фугасної або проникної дії. Інші ракети натомість мають бути розглянуті, як потенційно небезпечні для заглиблених ОКІ в разі прямих влучань. Для розрахунків прийнято фугасний проникний тип БЧ, як найбільш небезпечний.

Під час влучання, більшість ракет мають уже відпрацьований на кінцевій ділянці аеробалістичної (балістичної) траєкторії маршовий двигун. Відповідно вага ракети в момент влучання може бути зменшена на вагу використаного пального. Для сучасних ракет стандартної компоновки передбачений запас палива – 50-80 % ваги ракети [12]. Отже, ударна маса ракети у момент влучання може бути прогнозова-

но прийнята біля 35 % стартової ваги. Щодо швидкості в момент влучання, то у відкритому доступі дані є тільки про аеробалістичні ракети комплексу «Іскандер» – 800 м/с, тобто 33 % від максимальної, завдяки виконанню аеродинамічного маневрування та забезпеченню кращих умов для оптичного наведення [13] (при біля-надзвукових швидкостях не утворюється плазмова хмара на голівці).

Для гіперзвукових ракет падіння швидкості під час виконання маневру «гірка» в кінці польоту складає до 5,5 разів, що може бути прийнято для гіперзвукової авіаційної ракети Х-47М2 «Кинджал» (рисунок 2). Довжина БЧ, яка необхідна для подальших розрахунків фугасної дії, відома точно для ракет 9М723 (9М729) комплексу «Іскандер» (рисунок 3).

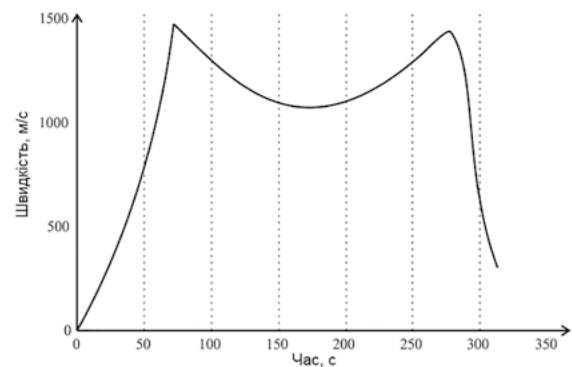
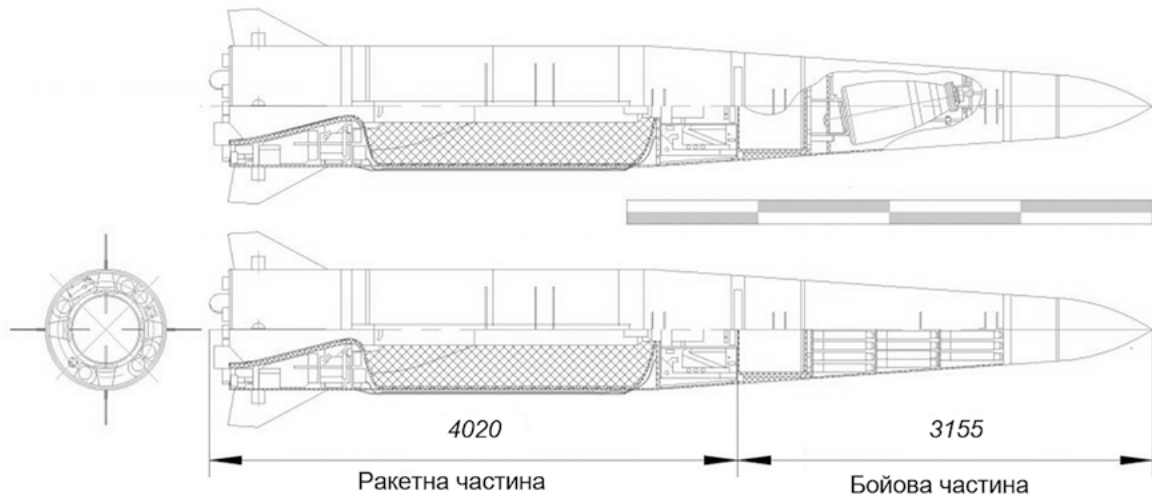
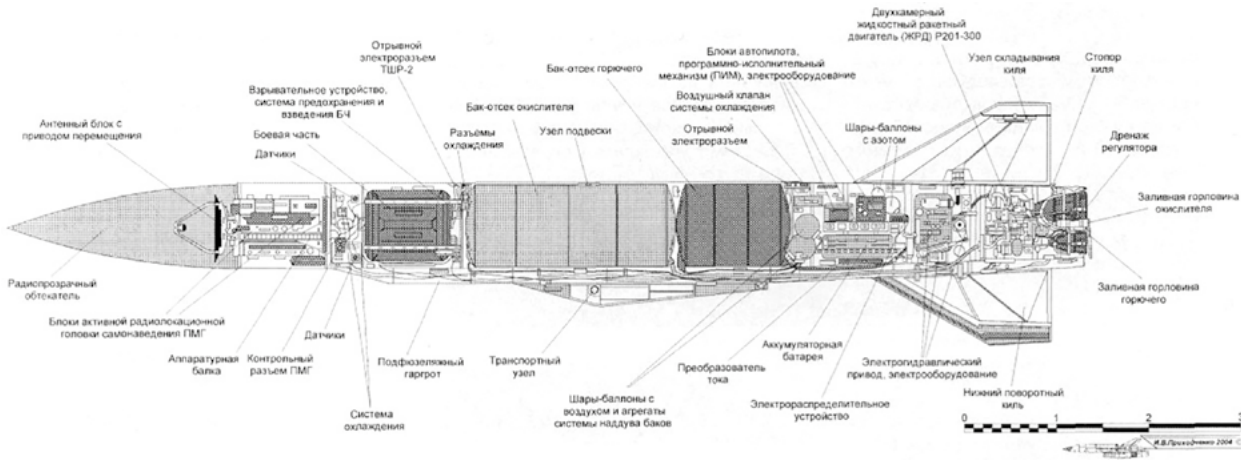


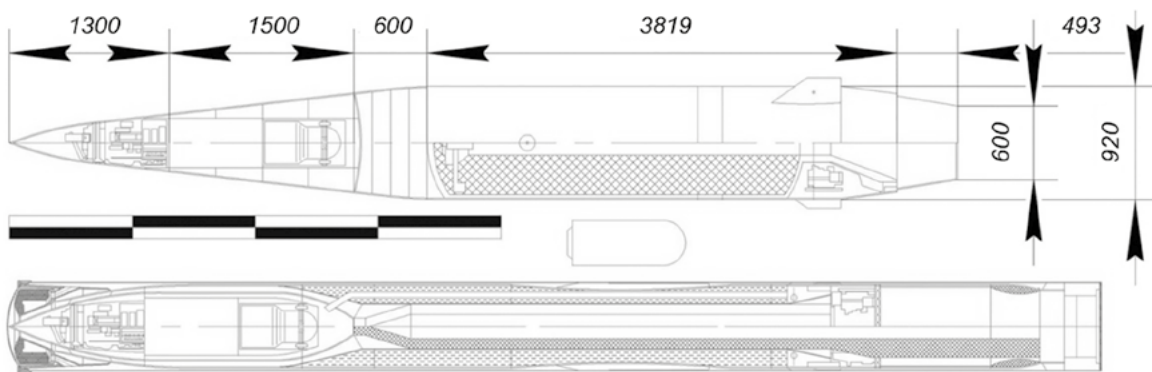
Рисунок 2 – Стандартний графік швидкості гіперзвукових балістичних ракет [12]



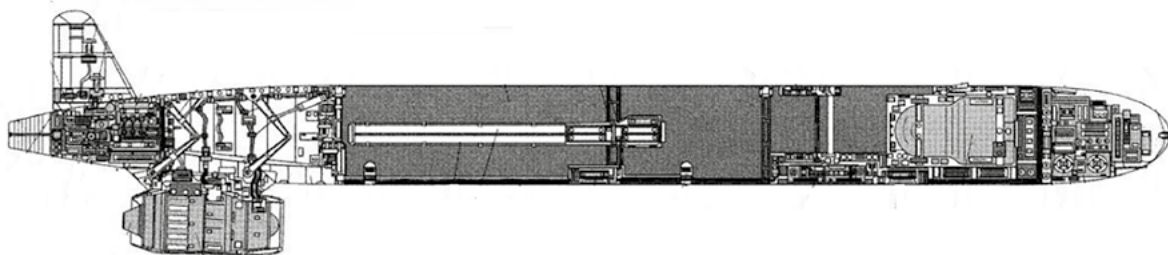
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3 – Компонувальні схеми ракет: 9М723 (9М729) комплексу «Іскандер» (а), Х-22 «Буря» [14] (б), Х-47М2 «Кінджал» (в), Х-55 (г)

Для ракети Х-22 довжина БЧ складає приблизно третину від загальної. Для ракети Х-47М2 «Кинджал» сукупна довжина БЧ біля 2,8 м. Для ракети Х-55, сукупна довжина БЧ біля чверті від загальної (рисунок 3). Відповідно до мети розрахунків цієї статті для інших ракет співвідношення може бути прийняте схожим. Отже, для подальших розрахунків необхідно прийняти додаткові характеристики ракет рф, які використовуються для ударів по ОКІ в Україні (див. таблицю 2).

Розрахунок і компоновання захисних товщ споруд укриття ОКІ

Захисні товщі споруд укриття ОКІ від прямих влучань зарядів складаються із 4-х обов'язкових компонентів [15], [16]: **1) обсипка споруди**, яка виконує маскувальні функції, а також перешкоджає розльоту уламків і, в деяких випадках, ініціює передчасно підривачі БЧ; **2) тюфяк**, який виконує роль затримуючої плити та призначений для зупинки механічного проникнення заряду і, відповідно, віддалення місця його можливого розриву в разі фугасної дії; **3) розподільчий шар**, який має амортизувати вибухову хвилю в разі вибуху заряду на тюфяк; **4) несучий шар** – остов заглибленої конструкції, який має витримувати як власну вагу з нормальним тиском ґрунту, так і варіанти тиску від вибухової ударної хвилі в землі – вертикальної або бічної.

Ударне навантаження, якого зазнають обсипка та тюфяк, може бути пораховане як механічна сила удару, яка діє на фізичне тіло в разі контакту з іншим фізичним тілом і залежить від швидкості. Тому, захисний шар (тюфяк) має бути окремо розрахований

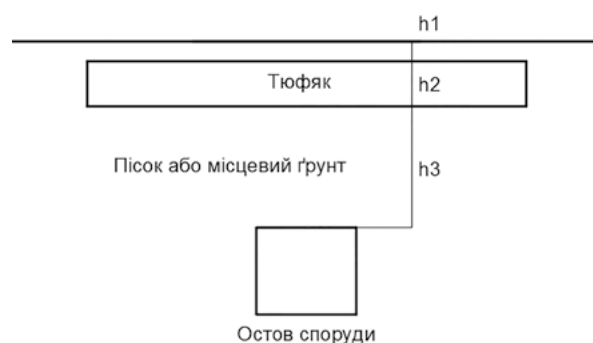


Рисунок 4 – Схема улаштування захисту заглибленого ОКІ

на ударне влучання, особливо з огляду на великі значення сили удару для швидкісних ракет і проникний тип їх БЧ. Для ракет Х-59 та П-800 «Онікс», які мають орієнтовну масу ВР більше 100 кг, але менше 250 кг, захисна товща покриттів над несучим шаром може бути прийнята в першому наближенні відповідно до [15], як для захисту від авіабомб масою до 250 кг. Проте для різноманітних типів ракет, має бути розглянута розрахункова методика, яка дозволяє визначити більш точно параметри захисного укриття під конкретні умови його розміщення.

Розрахунки захисних товщ можуть бути взяті з методики, наведеної в [15]. Згідно з нею спочатку обчислюють радіус h_{ϕ} руйнування ґрунту:

$$h_{\phi} = K_{\phi} \sqrt[3]{C} - C, \quad (1)$$

де K_{ϕ} – коефіцієнт податливості середовища фугасної дії – руйнуванню або відколу (береться за таблицею в додатку 1 до [15]);

Таблиця 2 – Додаткові відомості та ймовірні характеристики ракет рф, які використовуються для ударів по ОКІ в Україні

Тип ракети	Вага ВР, кг	Кут зустрічі, гр.	Маса в момент влучання, кг	Шв. в момент влучання, м/с	Довжина БЧ, м
9К79 «Точка-У»	162,5	90	703,5*	359,18*	2,77*
Х-59	201,5*	80*	315*	95,2*	1,9*
Х-22	630	80*	2023*	362,8*	3,9
9М723 «Іскандер»	312*	90	1330*	800	3,155
Х-55/Х-555	292,5*	80*	525*	84,9*	1,51
3М-14К/Т «Калібр»	292,5*	80*	462*	78,37*	2,05*
Х-47М2 «Кинджал»	325*	80*	1615,25*	741,82*	2,8*
Х-101	279,5*	80*	840*	65,3*	1,875*
П-800 «Онікс»	195*	80*	1365*	288,65*	2,225*
Х-35	94,25*	80*	234,5*	91,43*	1,1*

Примітка. * величина припущена на основі аналогів.

C – вага ВР, кг;

$\zeta = L/2$, відстань від центра заряду до поверхні, на якій механічно зупинився заряд, у м;

L – довжина заряду (для ракети може бути прийнята як довжина БЧ).

Стіни і покриття остовів захисних споруд приймаються розрахунком конструкції на навантаження від власної ваги, тиску ґрунту та тиску від вибухової ударної хвилі за законами будівельної механіки та опору матеріалів.

Безперечно, що навіть у разі розривів БЧ ракети на тюфяку або на безпечній відстані від споруди, якась частина хвилі та вібрацій все одно може передаватися на остов несучої конструкції. Для зменшення такого впливу на чутливе устаткування та обладнання заглиблених ОКІ, їх рекомендовано виконувати на відокремлених фундаментах і оснащувати віброзахистом.

Загальна глибина проникнення заряду (в цьому випадку ракети), визначається за емпіричним виразом:

$$h_{\phi} = K_{\phi} \sqrt[3]{C} - \zeta, \quad (2)$$

де h_{np} – глибина проникнення заряду по нормалі до зовнішньої поверхні перешкоди в метрах;

λ – коефіцієнт, який залежить здебільшого від форми заряду, рівний 1,3 в разі стрільби бетонобійними зарядами по бетону і 1,0 в інших випадках;

K_{np} – коефіцієнт податливості цього середовища проникненню (див. таблицю в додатку 1 до [15]);

P – вага снаряду (авіабомби) в момент зустрічі із перешкодою, кг. Оскільки йдеться про механічну проникність, то для випадку ракет, значення P може бути прийняте як вага ракети в момент влучання;

d – діаметр снаряду (авіабомби), у випадку, що розглядається, може бути прийнятий як діаметр корпусу ракети, м;

ν – швидкість снаряду (авіабомби), у момент зустрічі із перешкодою, в м/с, для випадку ракет відповідає кінцевій швидкості влучання;

α – кут між перпендикуляром до зовнішньої поверхні перешкоди до дотичної до траєкторії снаряду, для випадку ракет – це кут зустрічі з перешкодою.

Глибина проникання в шаруватому середовищі визначається через його заміну еквівалентним однорідним середовищем, пропорційно співвідношенню коефіцієнтів K_{np} для матеріалів, з яких сформовано захисний шар. Повна глибина воронки h_b визначається відповідно до виразу:

$$h_b = h_{\phi} + h_{es}, \quad (3)$$

де h_{ϕ} – глибина проникання;

h_{es} – глибина вибухової воронки, яка визначається із виразу:

$$h_{es} = K_{es} \sqrt[3]{C} - \zeta, \quad (4)$$

де K_{es} – коефіцієнт податливості середовища вибуху (див. таблицю в додатку 1 до [15]).

Товщина зовнішньої обсіпки, яка призначена, крім маскуванню, послабити ударну та осколкову дію ракети, призначається не менше 30..50 см.

Товщина тюфяка в шаруватих конструкціях за невеликої товщини обсіпки визначається за формулою:

$$h_m = 1,5h_{np}, \quad (5)$$

де h_{np} – глибина проникнення заряду за формулою (2), але з урахуванням взяття K_{np} для матеріалу тюфяка.

Розрахунок конструктивних параметрів стін несучого остову залежить від відстані b між зарядом, який проник у ґрунт, і стіною. При значенні $b = 0,75h_{\phi}$ розрахунок виконується на характеристичне еквівалентне квазістатичне навантаження 3 кг/см², при $b = 1h_{\phi}$ відповідно на навантаження приймається 1 кг/см². Відстань b може бути прийнята рівною консольному виносу тюфяка.

Очевидно, що збільшувати значення b консольним виносом тюфяка, набагато економічніше, аніж прикладати більше навантаження на цілий остов заглибленої споруди. Конструктивно тюфяк являє собою плавальну плиту на пружній основі, яка не повинна бути сполучена жорстко із несучим остовом захисної споруди ОКІ.

Товщина розподільчого шару в шаруватих конструкціях визначається виразом:

$$H_p = mh_{\phi}, \quad (6)$$

де m – коефіцієнт, який залежить від несучої здатності конструкції остову. Якщо конструкція перекриття остову може витримати додаткове навантаження від вибуху 1 кг/см², то $m = 1$, якщо 3 кг/см², то $m = 0,75$. Проміжні значення допускається приймати за інтерполяцією.

З погляду економічності, переважно вигідніше збільшувати розподільчу товщу на 25 %, ніж у три рази збільшувати навантаження на перекриття.

Як приклад, розглянемо крилату ракету X-55/X-555. Довжина БЧ становить – $L = 1,51$ м, вага ВР – $C = 292,5$ кг, діаметр – $d = 0,77$ м, швидкість у момент влучання – $\nu = 84,9$ м/с, кут на підльоті до об'єкта ураження – $\alpha = 10^{\circ}$, $P = 525$ кг, БЧ фугасної дії.

Для ракети X-55/X-555, λ прийемо рівним 1,0. Для однорідного не шаруватого ґрунту обсіпки (супісок), коефіцієнт податливості цього середовища проникненню прийемо $K_{np} = 0,0000050$.

Тоді загальна глибина проникнення ракети в разі фугасної дії становитиме:

$$h_{np} = \lambda K_{np} \frac{p}{d^2} \nu \cos \alpha =$$

$$= 1,0 \times 0,0000050 \times \left(\frac{525}{0,77^2} \right) \times 84,9 \cos 10^\circ =$$

$$= 0,37 \text{ м.}$$

$K_{\text{вз}}$ – коефіцієнт податливості середовища вибуху для супіску дорівнює 0,50. Глибина вибухової воронки:

$$h_{\text{вз}} = K_{\text{вз}} \sqrt[3]{C} - \zeta = 0,5 \sqrt[3]{292,5} - 0,755 = 2,94 \text{ м.}$$

Повна глибина воронки

$$h_{\text{в}} = h_{\text{ф}} + h_{\text{вз}} = 5,88 + 2,94 = 8,82 \text{ м.}$$

Під час проведення розрахунків розглянуто випадок, коли БЧ проникає через обсіпку і зупиняється на тюфяку із фортифікаційного залізобетону марки 400 із жорстким або гнучким противідколом. Коефіцієнт податливості цього середовища проникненню $K_{np} = 0,0000008$. Тоді товщина тюфяка за невеликої товщини обсіпки:

$$h_m = 1,5 h_{np} =$$

$$= 1,5 \times 1,0 \times 0,0000008 \times \left(\frac{525}{0,77^2} \right) \cdot 84,9 \cos 10^\circ =$$

$$= 0,09 \text{ м.}$$

У разі, коли БЧ проникає збоку від споруди, для однорідного нешаруватого ґрунту (супісок): $K_{\text{ф}} = 1$. Тоді $\zeta = L/2 = 1,51/2 = 0,755$ м. Тоді:

$$h_{\text{ф}} = K_{\text{ф}} \sqrt[3]{C} - \zeta = 1 \times \sqrt[3]{292,5} - 0,755 = 5,88 \text{ м.}$$

Отже, приймаємо $b = 1h_{\text{ф}} = 6,0 \text{ м} > 5,88 \text{ м}$, відтак навантаження на стіни остову може бути прийняте 1 кг/см^2 . Товщина розподільчого шару при $m = 1$ та при відповідному навантаженні від вибуху на перекриття 1 кг/см^2 , становить: $H_p = mh_{\text{ф}} = 5,88 \times 1 = 5,88 \text{ м}$. У такий спосіб, округлено, приймаємо розподільчий шар завтовшки 6,0 м. Аналогічні чисельні дослідження були проведені для всіх типів ракет, що розглядаються. Результати наведені в таблиці 3.

Вище розглянуто занурені типи захисних споруд із мінімальною обсіпкою 0,3 м. Найбільш небезпечною для заглиблених споруд є ракета Х-22, оскільки захист від її прямих влучань вимагає товщину розподільчого шару 6,62 м. Натомість ракета Х-47М2 «Кинджал» через значну швидкість, вимагає найбільшої товщини тюфяка 1,75 м.

У резерв надійності, для убезпечення руйнування ОКІ, зокрема від дії перспективних засобів озброєння, пропонується зведений варіант компоновки заглиблених споруд. На рисунку 5 наведено приклад компоновки з розмірами для обраного ґрунту розподільчого шару – супісок.

Оскільки напрямок прильоту ракети не може бути спрогнозованим, то прийнято розширення тюфяка рівномірно довкола споруди.

Для інших типів ґрунтів згідно з таблицею, наведеною в [15], також отримано параметри схем компонування заглиблених споруд. Рихлий ґрунт та скелясті типи ґрунтів не розглядалися.

Таблиця 3 – Сумарна захисна товща заглиблених захисних споруд залежно від типу ракети

Тип ракети	Загальна глибина h_{np} проникнення ракети, м	Прийнята товщина обсіпки, м	Загальна глибина проникнення ракети у разі фугасної дії, м	Товщина тюфяка h_m за тонкої обсіпки, м	Глибина фугасної дії (і винос тюфяка), м	Товщина розподільчого шару, м	Загальна товща, м
Х-59	0,92	0,3	0,15	0,22	4,91	4,91	5,43
Х-22	4,09	0,3	0,65	0,98	6,62	6,62	7,28
9М723 «Іскандер»	6,29	0,3	1,01	1,51	5,20	5,20	6,21
Х-55/Х-555	0,37	0,3	0,06	0,09	5,88	5,88	5,94
3М-14К/Т «Калібр»	0,67	0,3	0,11	0,16	5,61	5,61	5,72
Х-47М2 «Кинджал»	7,28	0,3	1,17	1,75	5,48	5,48	6,64
Х-101	0,49	0,3	0,08	0,12	5,60	5,60	5,68
Х-59	4,32	0,3	0,69	1,04	4,69	4,69	5,38
Х-35	0,6	0,3	0,1	0,14	4,0	4,0	4,10



Рисунок 5 – Принципові розміри схеми компонування заглиблених споруд із захистом ОКІ

Отримані результати наведені в таблиці 4. Матеріалом тюфяка взято фортифікаційний залізобетон марки 400 з жорстким або гнучким противідколом.

За товщини тюфяка 1,75 м і невеликої товщини обсіпки, він розраховується насамперед на ударне навантаження від ракети. Передбачено, що на тюфяку ракета зупиниться і вибухне, при чому він частково руйнується. Армування плити має бути виконано зі зміщенням у декілька рівнів, у двох напрямках, з урахуванням додаткового противідкольного шару в нижній зоні, відсічок та швів бетонування етапами. Під плитою облаштовується подушка із ущільненого щебеню не менше 300 мм, а також бетонна підготовка 150 мм. З метою зменшення впливу опадів на ґрунт обсіпки по верху плити доцільно зробити водовідведення у спеціальні дренажні канавки тощо. За високого рівня ґрунтових вод навколо споруди можливо також передбачити спеціальні заходи із водопониження, гідроізоляції та дренажу. Через різні причини (щільність підземних комунікацій, гідрогеологічні умови тощо), споруди можуть бути заглиблені частково або незаглиблені. Вирішення для частково заглиблених споруд мають перевагу в тому, що вийнятий для занурення ґрунт може бути використаний як обсіпка, досягаючи балансу земляних

робіт. З іншого боку, втрачається рівність поверхні над спорудою, а заодно її маскувальні властивості, зростають обсяги зовнішнього планування території. Вирішення для незаглиблених – можуть на відміну від інших – бути реалізовані для існуючих (переважно, надземних) споруд. Але при тому значно збільшуються обсяги земляних робіт, а відсіпка ґрунтом займає значну площу довкола споруди та демаскує її. Приклади компонувальних схем укриття із частковим заглибленням та без заглиблення для умовного елемента ОКІ завширшки 12 м, показано на рисунку 6.

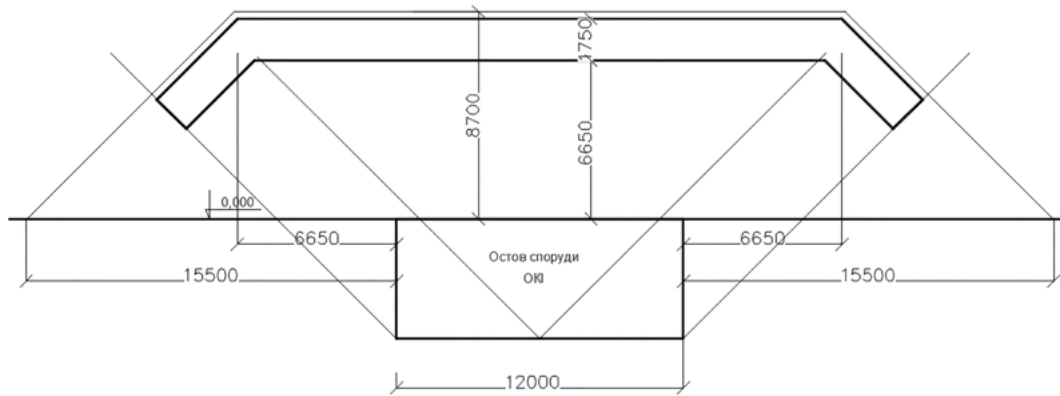
Описані вирішення вимагають також додаткових обсягів залізобетону для облаштування «навісу» з метою компенсування недостатньої товщі ґрунту в разі кутових влучань, обвалування із відповідними стінами тощо.

Враховуючи, що найбільш критичними в об'єктах енергетики є розподільчі пристрої, доцільним є заглиблене розміщення саме цих елементів ОКІ [17], [18].

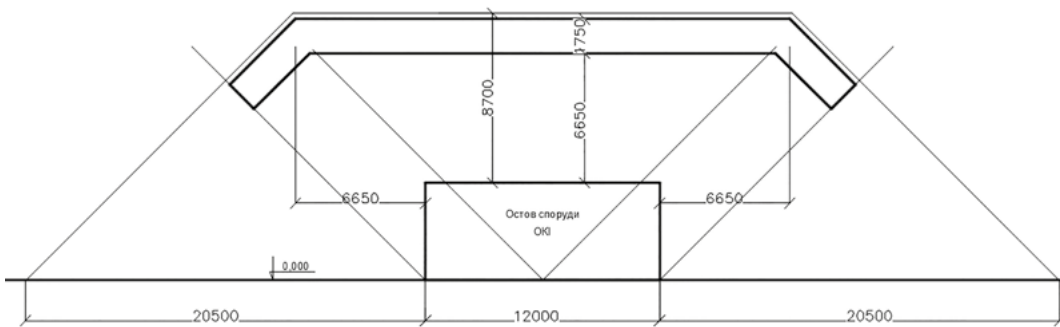
Найбільш простим, з погляду технологічності, є улаштування укриття без заглиблення з обсіпкою. Наразі вже розроблено концепт проєкту захисту підстанції 330 кВ у разі її відбудови на новому місці; на деяких ОКІ України вже йде впровадження подібних рішень (рисунок 7).

Таблиця 4 – Сумарна захисна товща заглиблених споруд залежно від типу ґрунту розподільчого шару

Тип ґрунту	Прийнята товщина обсіпки, м	Товщина тюфяка, за тонкої обсіпки, м	Товщина розподільчого шару, м	Сумарна мінімальна захисна товща до несучого шару, м
Супісок, суглинок, глина щільна	0,3	1,75	6,62	8,67
Пісок щільний	0,3	1,75	6,97	9,02
Ґрунт звичайний	0,3	1,75	7,22	9,27



a



б

Рисунок 6 – приклад розрізу компонуальної схеми укриття
із частковим заглибленням (а); без заглиблення з обсіпкою (б)

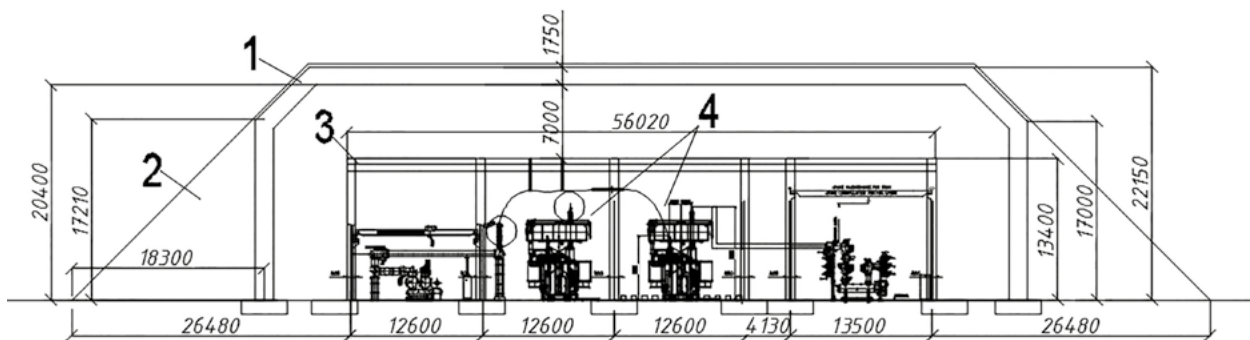


Рисунок 7 – Приклад перерізу компоновки елементів інженерного захисту укриття нової підстанції 330 кВ із і
грунтовою обсіпкою: 1 – залізобетонна оболонка (түфяк); 2 – розподільча товща і обсіпка; 3 – остов захисної
споруди; 4 – елементи ОКІ, які захищаються

Висновки

Безперечно, заглиблення споруд і їх елементів з погляду конструктивного облаштування потребує значних початкових ресурсів і часу. Проте ракетні ураження ОКІ несуть неспівмірно більші втрати для національної економіки та безпеки. У кожному випадку мають окремо ухвалюватися відповідні організаційно-технологічні та конструктивні рішення щодо способів реалізації проектів інженерного захисту, з урахуванням технологічних особливостей та оцінки доцільності [17], [19].

Перспективні наукові дослідження потрібно спрямувати на розробку типових технічних рішень для укриття спеціалізованих ОКІ та їх елементів, уточнення технологічних вимог та особливостей для проектування, натурні експерименти із уточнення захисних товщ споруд та їх складових.

Враховуючи описані у статті існуючі проектні загрози і те, що вони можуть залишатися й надалі, вбачається доцільним розробити методику оцінки і раціонального вибору заходів, які можуть бути обґрунтовані для пом'якшення цих загроз, з урахуванням їх фізичної реалізації та критеріїв життєвого циклу. Водночас, має бути враховано

існуючий закордонний досвід, що дозволить у разі необхідності виробити відповідні пропозиції до змін та уточнень національного законодавства. Реалізація комплексного захисту ОКІ на основі розроблених принципів згідно з концепцією «Країна-фортеця» дозволить створити стійку економіку в умовах існуючих і майбутніх воєнних загроз та забезпечити сталий розвиток України, що наблизить її стратегічну перемогу у війні.

Список використаної літератури

1. Залужний В., Забродський М. Перспективи забезпечення воєнної кампанії 2023 року: український погляд. *Укрінформ*, 07.09.2022. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/3566162-ak-zabezpeciti-voennu-kampaniu-u-2023-roci-ukrainskij-poglad.html>.
2. Про критичну інфраструктуру: Закон України від 16.11.2021 р. № 1882-IX: станом на 05.12.2022. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text>.
3. Коцюрба В. І., Білик А. С., Веретнов А. О. та ін. Методика розрахунків та обґрунтування вимог до інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури від БПЛА типу баражуючий боєприпас. *Опір матеріалів і теорія споруд*. 2022. № 109. С. 164-183.
4. Use of Underground Facilities to Protect Critical Infrastructures. National Research Council 1998 DC: The National Academies Press. 70 p.
5. Шварц К. Масована атака Росії 23 листопада: стало відомо, скільки ракет збили ЗСУ. *УНІАН*. 23.11.2022. URL: <https://www.unian.ua/war/masovana-ataka-rosiji-23-listopada-skilki-raket-zbili-zsu-12054906.html>.
6. Корогодський Ю. Українські війська ППО збили понад 60 російських ракет. *LB.ua*. 05.12.2022. URL: https://lb.ua/society/2022/12/05/538134_ukrainski_viyska_ppo_zbili_ponad_60.html.
7. Березина А. Искандер, Калибр, серия X. Якими ракетами Росія б'є по Україні. *РБК-Україна*. 7.7.2022. URL: <https://www.rbc.ua/ukr/news/iskander-kalibr-seriya-h-kakimi-raketami-1657117961.html>.
8. Missiles of Russia. *Missile Threat*. 10.08.2021. URL: <https://missilethreat.csis.org/country/russia/>.
9. Мануйленко В. Г., Удин Е. Г., Теоретические основы крылатых управляемых ракет. СПб: Университет ИТМО, 2020. 201 с.
10. Forss S. The russian operational-tactical Iskander missile system. National Defence University, Department of strategic and defence studies; Series 4: working papers No 42. Helsinki : National Defence University, 2012. 26 p.
11. Україна під обстрілом російських ракет: чим забезпечити захист (аналіз). *Військовий портал Defense Express*. 03.04.2022. URL: https://defence-ua.com/weapon_and_tech/ukrajina_pid_obstrilom_rosijskih_raket_chim_zabezpechiti_zahist_analiz-6772.html.

12. Harlin W.J., Cicci D.A. Ballistic missile trajectory prediction using a state transition matrix. *Applied Mathematics and Computation*. 2007. No. 188(2). P. 1832–1847.

13. Цыгикало Н. Сказание об «Искандере», или Как работает тактический ракетный комплекс. *Naked Science*. 02.05.2021. URL: <https://naked-science.ru/article/tech/raketa-iskander>.

14. Крылатая ракета X-22 (комплекс K-22). *Ракетная техника*. URL: <https://missilery.info/missile/x22>.

15. Наставление для инженерных войск ПФ-43 .Ч.2. 1946. 363 с.

16. Kotsyuruba V., Datsenko I., Dachkovsky V., Cherevko R., Androshchuk O., Tsybizov A., Kryvtsun V. Methodological and scientific approach into the process of calculation a multilayer underground protective structure. *Strength of Materials and Theory of Structures. Strength of Materials and Theory of Structures*. 2021. No. 107. P. 159-169.

17. Linger D. A., Baker G. H., Little R. G. Applications of underground structures for the physical protection of critical infrastructure. *North American Tunneling 2002*. Proceedings of the NAT Conference, Seattle, 18-22 May 2002. London : CRC Press, 2002.

18. Watson M. B., Kammer W. A., Langley N. P., Selzer L. A., Beck R. L. Underground nuclear power plant siting. Environmental Quality Laboratory Report, 6. Calif. Institute of Technology, 1972.

19. Білик А. С. Сталь у реконструкції будівель. К.: УЦСБ, 2018. 176 с.

References

1. Zaluzhnyi, V., Zabrodskiy, M. (2022, 7 July). Prospects for ensuring the military campaign of 2023: the Ukrainian view. *Ukrinform*. Retrieved from: <https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/3566162-ak-zabezpeciti-voennu-kampaniu-u-2023-roci-ukrainskij-poglad.html>.
2. On Critical Infrastructure, Law of Ukraine No. 1882-IX dated 16 November 2021. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text>.
3. Kotsyuruba, V., Bilyk, A., Weretnow, A. et al. (2022). Methodology of calculations and substantiation of requirements for engineering protection of critical infrastructure objects against UAS. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 109, 164-183.
4. Use of underground facilities to protect critical infrastructures. National Research Council 1998 DC. The National Academies Press, 70 p.
5. Schwartz, K. (2022, 23 November). Russia's massive attack on 23 November 2022: it became known how many missiles were shot down by the Armed Forces. *UNIAN*. Retrieved from: <https://www.unian.ua/war/masovana-ataka-rosiji-23-listopada-skilki-raket-zbili-zsu-12054906.html>.
6. Korohodskiy, Yu. (2022). Ukrainian air defense forces shot down more than 60 Russian missiles on 5 December 2022. *LB.ua*. Retrieved from: https://lb.ua/society/2022/12/05/538134_ukrainski_viyska_ppo_zbili_ponad_60.html.

7. Berezina, A. (2022, 7 July). Iskander, Kalibr, series H. What missiles does Russia use to attack Ukraine? *RBC-Ukraine*. Retrieved from: <https://www.rbc.ua/ukr/news/iskander-kalibr-seriya-h-kakimi-raketami-1657117961.html>.

8. Missiles of Russia. (2021, 10 August). *Missile Threat*. Retrieved from: <https://missilethreat.csis.org/country/russia/>.

9. Manuylenko, V., Udin, E. (2020). Theoretical foundations of cruise guided missiles. St. Petersburg, ITMO University, 201 p.

10. Forss, S. (2012). The russian operational-tactical Iskander missile system. National Defence University, Department of strategic and defence studies, Series 4: working papers No. 42, Helsinki. 26 p.

11. Ukraine under fire from Russian missiles: how to provide protection (analysis). (2022, 3 April). *Military portal Defense Express*. Retrieved from: https://defence-ua.com/weapon_and_tech/ukrajina_pid_obstrilom_rosijskih_raket_chim_zabezpechiti_zahist_analiz-6772.html.

12. Harlin, W., Cicci, D. (2007). Ballistic missile trajectory prediction using a state transition matrix. *Applied Mathematics and Computation*, 188(2), 1832–1847.

13. Tsyhykalo, N. (2021). The legend of the Iskander, or how the tactical missile system works. *Naked Science*. Retrieved from: <https://naked-science.ru/article/tech/raketa-iskander>.

14. Cruise missile Kh-22 (complex K-22). *Missilery.info*. Retrieved from: <https://missilery.info/missile/x22>.

15. Field manual for engineering troops PF-43. Part 2. 1946, 363 p.

16. Kotsiuruba, V., Datsenko, I., Dachkovskiy, V., Cherevko, R., Androshchuk, O., Tsybizov, A., Kryvtsun, V. (2021). Methodological and scientific approach to the process of calculation of a multilayer underground protective structure. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 107, 159-169.

17. Linger, D., Baker, G., Little, R. (2002). Applications of underground structures for the physical protection of critical infrastructure. *North American Tunneling*. Proceedings of the NAT Conference, Seattle, 18-22 May 2002. London, CRC Press, 2002.

18. Watson M., Kammer, W., Langley, N., Selzer, L., Beck, R. (1972). Underground nuclear power plant siting. Environmental Quality Laboratory Report, 6, California Institute of Technology.

19. Bilyk, A. (2018). Steel in the reconstruction of buildings. Kyiv, USCC, 176 p.

Protection of Critical Infrastructure Objects of Ukraine against Direct Missile Hits Using Underground Structures

V. Kotsiuruba¹, A. Bilyk², V. Bzot³, I. Dzeverin³

¹The National Defense University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskiy, Kyiv, Ukraine

²Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

³Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

The article analyzes the main threats to Ukrainian critical national infrastructure (CNI) by cruise and aeroballistic russian missiles. The known characteristics of the main missiles of the enemy, as well as approximate calculations of their specific parameters, are collected.

The methodology for calculating the protective layers of underground shelters for critical infrastructure facilities, as well as their layout schemes for the different types of vaults is presented. Based on the analysis of calculation data, the expediency of the buried location for the main elements of CNI facilities, in particular distribution substations, etc., is shown. The geometric dimensions of vaults are presented depending on soil parameters.

The article is part of the authors' series of publications on the "Fortress Country" concept developed by them, whose implementation is aimed at ensuring integral protection of the territory of Ukraine, facilities, citizens, and systems.

Keywords: critical national infrastructure, CNI, damage, missiles, direct hits, impact, explosion, electricity substation, engineering protection, fortification, underground structures, russian aggression.

Отримано 08.12.2022