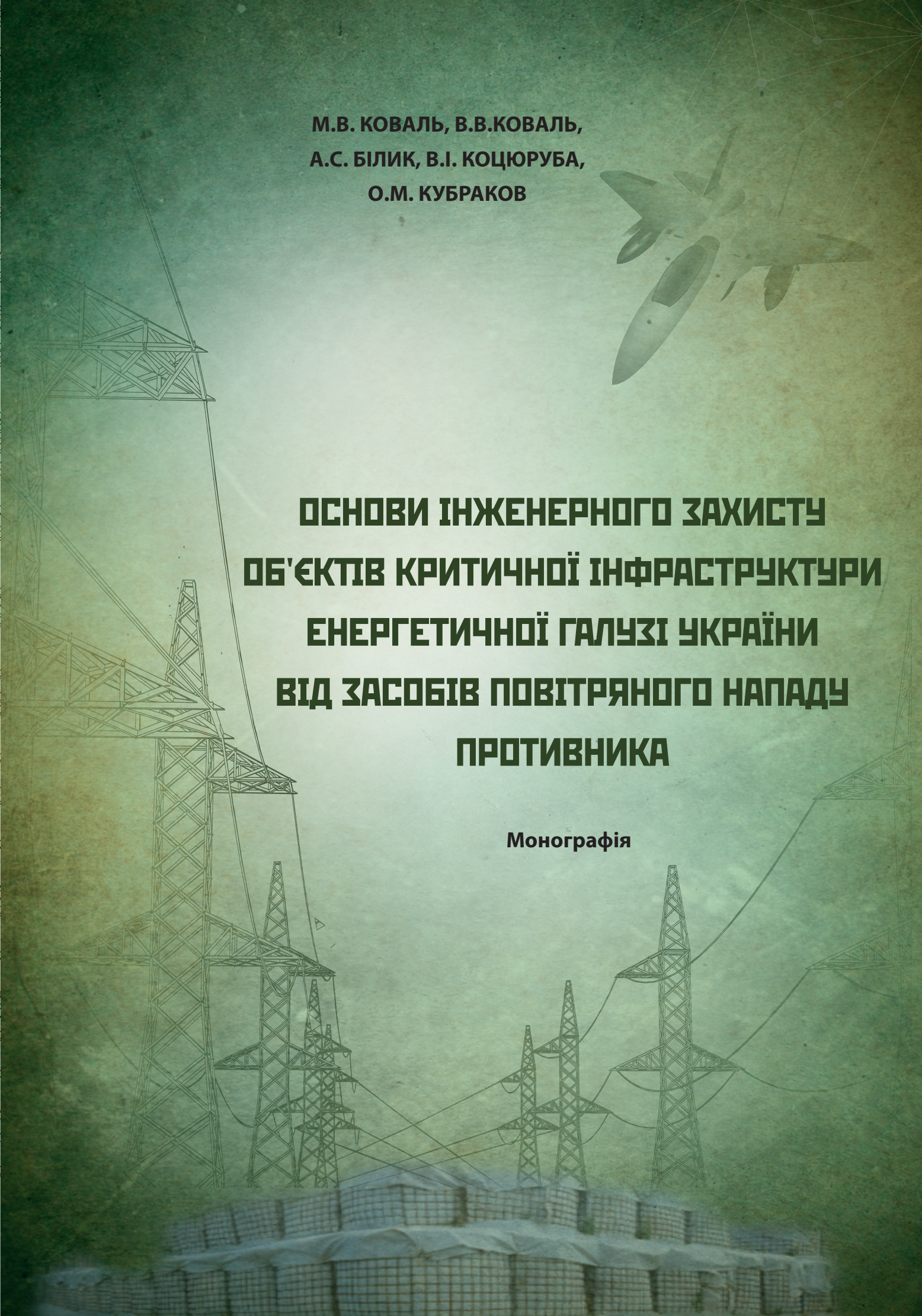


**М.В. КОВАЛЬ, В.В. КОВАЛЬ,
А.С. БІЛИК, В.І. КОЦЮРУБА,
О.М. КУБРАКОВ**



**ОСНОВИ ІНЖЕНЕРНОГО ЗАХИСТУ
ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ
ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ
ВІД ЗАСОБІВ ПОВІТРЯНОГО НАПАДУ
ПРОТИВНИКА**

Монографія

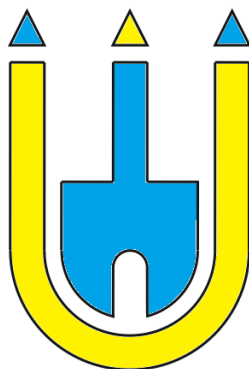


МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ
ГЕНЕРАЛЬНИЙ ШТАБ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ

**М.В. КОВАЛЬ, В.В.КОВАЛЬ, А.С. БІЛИК, В.І. КОЦЮРУБА,
О.М. КУБРАКОВ**

**ОСНОВИ ІНЖЕНЕРНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ
ІНФРАСТРУКТУРИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ
ВІД ЗАСОБІВ ПОВІТРЯНОГО НАПАДУ ПРОТИВНИКА**

МОНОГРАФІЯ



Видавництво Ліра-К
Київ – 2023

УДК 340:007 (623.126, 624)

ББК 38.79

О72

Рецензенти: С.П. Бісик (доктор технічних наук, професор);
О.А. Тугай (доктор технічних наук, професор);
О.В. Савицький (експерт з питань енергетики та захисту довкілля)

О72 Основи інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури енергетичної галузі України від засобів повітряного нападу противника: монографія, / [М.В. Коваль, В.В. Коваль, А.С. Білик, В.І. Коцюруба, О.М. Кубраков]; під ред. А.С.Білика. – К.: Генеральний штаб Збройних Сил України, 2023. – 185 с.

ISBN 978-617-520-660-7

У монографії розкрито основні теоретичні, методологічні та практичні аспекти інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури України.

Монографія має допомогти у вирішенні питань оцінювання інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури та проєктування цивільними і військовими інженерами, підтримання прийняття рішень керівниками та особами, відповідальними за інженерне обладнання, а також може бути використана як консультативний матеріал для підрядників, що безпосередньо виконують роботи на об'єктах. Розрахункові методики, викладені у монографії, універсальні для розроблення систем фізичного захисту від будь-яких засобів повітряного нападу противника кінетичної дії.

За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей відповідальні автори.

Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради Національного університету оборони України.

ISBN 978-617-520-660-7

© Міністерство оборони України, 2023

© Генеральний штаб Збройних Сил України, 2023

© Національний університет оборони України, 2023

© Видавництво Ліра-К, 2023

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	5
Вступ.....	6
РОЗДІЛ 1. ОБ’ЄКТИ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ.....	9
1.1 Структура та сучасний стан енергетичної галузі України...	9
1.2. Елементний склад окремих об’єктів – представників основних об’єктів критичної інфраструктури енергетичної галузі.....	13
1.3. Нормативна база класифікації та захисту критичної інфраструктури.....	24
1.4. Методики визначення критичності елементів об’єктів критичної інфраструктури.....	31
РОЗДІЛ 2. ЗАСОБИ ПОВІТРЯНОГО НАПАДУ ПРОТИВНИКА НА ЕНЕРГЕТИЧНУ ГАЛУЗЬ УКРАЇНИ.....	36
2.1. Типологія та характеристика загроз від засобів повітряного нападу Російської Федерації.....	36
2.2. Особливості і спроможності нанесення повітряних ударів Російською Федерацією по енергетичній критичній інфраструктурі України.....	51
РОЗДІЛ 3. СИСТЕМИ ІНЖЕНЕРНОГО ЗАХИСТУ ОБ’ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ ЗА ПРИНЦИПОМ “КРАЇНА-ФОРТЕЦЯ”.....	59
3.1. Ретроспективний огляд інженерного захисту об’єктів критичної інфраструктури	59
3.2. Концепція інженерного захисту об’єктів критичної інфраструктури за принципом “Країна-фортеця”.....	67
3.3. Опис основних конструктивних рішень першого рівня захисту.....	70
3.4. Опис основних конструктивних рішень другого рівня захисту.....	76
3.5. Опис основних конструктивних рішень третього рівня захисту.....	82
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАГРОЗ ТА ІНЖЕНЕРНОГО ЗАХИСТУ ОБ’ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ.....	88
4.1. Експериментальні лабораторні дослідження параметрів безпілотних літальних апаратів.....	88
4.2. Експериментальні числові дослідження предетонаційних захисних екранів від влучань безпілотних літальних апаратів для споруд другого рівня захисту.....	92
4.3. Експериментальні чисельні дослідження параметрів ракетних загроз для споруд третього рівня захисту.....	97
4.4. Експериментальні числові дослідження захисних споруд третього рівня захисту	102

РОЗДІЛ 5. ОСНОВИ ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМ ІНЖЕНЕРНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ ЗА ПРИНЦИПОМ “КРАЇНА-ФОРТЕЦЯ”	106
5.1. Визначення розрахункових сценаріїв та дій на конструкції захисних споруд	106
5.2. Попереднє визначення параметрів захисних конструкцій...	112
5.3. Визначення дій основних факторів ураження ЗПН на несучі конструкції споруд інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури.....	119
5.4. Загальні положення проєктування та розрахунки проведення окремих елементів захисту.....	124
РОЗДІЛ 6. ОЦІНЮВАННЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНЖЕНЕРНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ.....	135
6.1. Техніко-економічне порівняння варіантів і прийняття рішень про вибір інженерного захисту для елементів об'єктів критичної інфраструктури.....	135
6.2. Приклади порівняльного економічного оцінювання життєвого циклу об'єктів критичної інфраструктури.....	145
6.3. Напрями підвищення ефективності та подальшого розвитку інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури від засобів повітряного нападу противника.....	156
Післямова.....	165
Список джерел.....	169
Додатки.....	178

Перелік умовних скорочень

БпЛА – безпілотні літальні апарати
БЧ – бойова частина
ВР – вибухова речовина
ВУХ – вибухово-ударна хвиля
ЖЦ – життєвий цикл
ЗПН – засоби повітряного нападу
ЗРК – зенітно-ракетний комплекс
ЗСУ – Збройні Сили України
ІЗ – інженерний захист
НПЗ – нафтопереробний завод
ОЕС – об'єднана електроенергетична система
ОКІ – об'єкти критичної інфраструктури
ППО – протиповітряна оборона
ПС – підстанція
РБ – Республіка Білорусь
РЕБ – радіоелектронна боротьба
РЕР – радіоелектронна розвідка
РФ – Російська Федерація
СНЕ – система накопичення енергії
ЧПЕ – частково проникний екран

Справжній захист воїна не у кількості його щитів,
а у відсутності вразливих місць.
Д.Хуан Матус

Вступ

Збройна агресія Російської Федерації стала найбільшим викликом для національної безпеки України за весь час її самостійності. Внаслідок атак на територію України вже уражено досить велику кількість об'єктів критичної інфраструктури, зокрема енергетичної галузі України – електроенергетичної, газотранспортної систем і нафтовидобувної промисловості паливно-енергетичного комплексу України. Тривалий час головною можливою загрозою воєнного часу для національної інфраструктури вважалися чинники дій ядерних ударів на певній відстані від об'єктів критичної інфраструктури, при цьому системи захисту були зосереджені насамперед на убезпеченні населення та працівників від впливу іонізуючого випромінювання і тиску ударної хвилі. У новітній час ХХІ століття, особливо після початку воєнних дій Російської Федерації супроти нашої держави у 2014 році, основними типами загроз для об'єктів критичної інфраструктури стали терористичні акти, диверсії, саботаж та кібернетичні атаки, що викликало необхідність відповідних змін в архітектурі безпеки та стійкості об'єктів критичної інфраструктури.

Повномасштабне вторгнення Російської Федерації на територію України у лютому 2022 року супроводжується попередніми та новітніми загрозами, насамперед застосуванням високоточних засобів повітряного нападу противника – ракет та безпілотних літальних апаратів. Ключовими характеристиками високоточних засобів повітряного нападу є їх різнотипність та інтенсифікація застосування, вибіркове ураження боєприпасами найважливіших критичних елементів об'єктів критичної інфраструктури, мінлива комбінована тактика застосування їх країною-агресором, спроби введення в оману тощо. Воєнна агресія Російської Федерації має ознаки тривалої, а перемога України у війні означає не тільки повернення загарбаних територій, а і створення системи безпеки, що мінімізує чинники виникнення можливих загроз в майбутньому [1].

Оскільки жодна країна ще не зіштовхувалася з подібними масштабами руйнування об'єктів на своїй території, кількістю і потужністю атак, порівняно з тим, що відбувається в Україні, можна говорити, що завдання захисту національної інфраструктури такого рівня поставлено вперше. Із перших днів повномасштабного вторгнення, над його вирішенням працюють різноманітні установи, організації, визначені відповідальні органи, робочі групи тощо. Очевидно, що неминуча відбудова країни як в умовах воєнного стану, так і після нашої перемоги відбуватиметься з урахуванням вимог до забезпечення максимального збереження ключових функцій об'єктів критичної інфраструктури в умовах перманентних воєнних загроз – як

прямих, так і опосередкованих [1]. Такі виклики потребують асиметричних відповідей, довгострокової візії та системних безпекових програм на державному рівні. Вбачається, що побудова ефективної системи захисту об'єктів критичної інфраструктури є одним з найбільш пріоритетних завдань держави. На жаль, станом на час написання цієї праці вести розмову про достатній рівень захисту критичної інфраструктури поки зарано. Вирішення питання захисту національної інфраструктури, безперечно має бути комплексним і включати як активний, так і пасивний захист.

На сьогодні розглядувана проблема є загальносвітовою, тому що застосування засобів повітряного нападу Російської Федерації по об'єктам критичної інфраструктури України не мають аналогів за масштабами, демонструючи тенденції та виклики війн майбутнього. Найкращі системи активного захисту, протиповітряної оборони, розроблені до цього часу у Світі, мають технологічний поріг ефективності застосування у разі знешкодження високоточних, далекобійних і потужних засобів повітряного нападу противника. Отже основу безпеки об'єктів критичної інфраструктури мають становити їх децентралізація, резервування та пасивний фізичний захист, тобто сукупність заходів з інженерного обладнання елементів об'єктів критичної інфраструктури для підвищення їх живучості, безпеки персоналу та стійкого функціонування держави в інтересах забезпечення життєвих потреб суспільства [2].

Відповідно до актуальних викликів авторами монографії розроблено нова концепція побудови перспективної системи інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури за принципом “Країна-фортеця”, покликану забезпечити інтегральний захист території, об'єктів, громадян і суспільства в цілому від актуальних загроз, стати складовою національної безпеки України [3]. На практиці це означає насамперед прикриття об'єктів критичної інфраструктури, цивільний захист, стійкість систем життєзабезпечення, безпеку міського середовища тощо. Концепція побудови перспективного інженерного обладнання об'єктів критичної інфраструктури ґрунтується на розумінні явищ та процесів застосування противником засобів повітряного нападу і містить сукупність поглядів про специфіку, обсяги і організацію виконання заходів із захисту найважливіших елементів об'єктів критичної інфраструктури [4].

Об'єкти критичної інфраструктури енергетичної галузі України є одними із пріоритетних цілей противника. Також для сучасної економіки енергетична галузь є основою промисловості, зв'язку і зрештою прямо впливає на ефективність ведення бойових дій [15]. Саме тому матеріали монографії спрямовані на визначення основ інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури енергетичної галузі від засобів повітряного нападу Російської Федерації. Написана протягом 2022-2023 років, монографія безумовно відображає стан розуміння питання в умовах активних воєнних дій противника на території України, описує основні чинники загроз та можливості захисту. У ній також описано ймовірні засоби повітряного

нападу та перспективні заходи убезпечення від них. Впевнено можна сказати, що загальні принципи захисту залишаться актуальними протягом багатьох років як воєнного так і мирного часу. Монографія має на меті стати в нагоді під час оцінювання захисту об'єктів критичної інфраструктури та проєктування їх цивільними і військовими інженерами, підтримкою у прийнятті рішень керівниками та фахівцями, відповідальними за інженерне обладнання, а також консультативним матеріалом для підрядників, що виконують безпосередні роботи із інженерного захисту на об'єктах. Розрахункові методики, викладені у монографії, універсальні для розроблення захисних інженерних систем від будь-яких засобів повітряного нападу противника кінетичної дії.

РОЗДІЛ 1. ОБ'ЄКТИ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ

1.1. Структура та сучасний стан енергетичної галузі України

Енергетика України – це сукупність галузей господарства нашої країни, які використовують енергетичні ресурси для вироблення, перетворення, передавання та розподілу енергії; об'єднання електроенергетичної, газової та нафтової галузей України.

Електроенергетика – базова галузь економіки України, що є однією з найстаріших в країні. Генерація електроенергії ґрунтується на атомній енергетиці, спалюванні вугілля, мазуту, природного газу, біопалива, а також застосуванні відновлюваних джерел енергії вітру, води, Сонця.

Основу централізованої електрогенерації в Україні (рис. 1.1) становлять атомні електростанції (АЕС), теплові електростанції (ТЕС), теплоелектроцентралі (ТЕЦ), гідроелектростанції (ГЕС) та гідроакumuлюючі електростанції (ГАЕС).

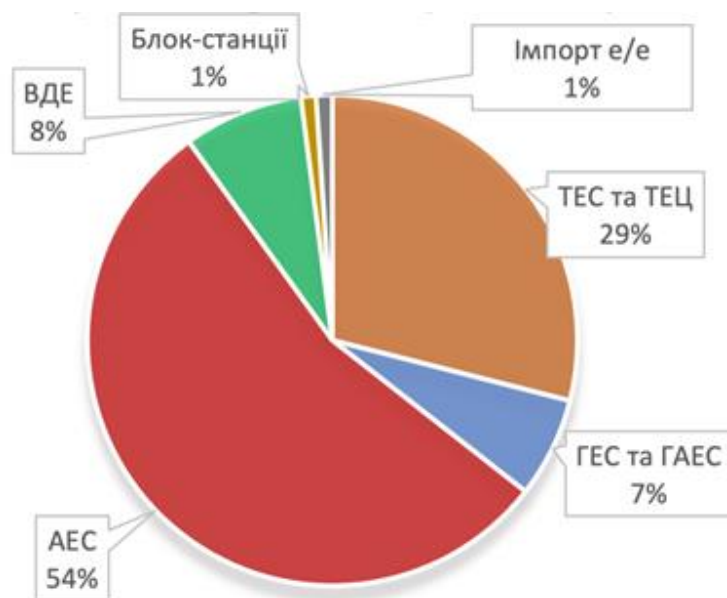


Рис.1.1. Структура джерел електроенергетики України станом до 2022 року [6]

До 2022 року в об'єднаній енергосистемі України функціонували 4 атомні електростанції, 15 ТЕС та 43 ТЕЦ, 8 великих гідроелектростанцій і 3 ГАЕС [7].

Найбільші ТЕС розташовані на Донеччині (Вуглегірська, Старобешівська, Курахівська, Зуївська та ін.), Придніпров'ї (Придніпровська, Криворізька), у Харківській (Зміївська), Київській (Трипільська), Івано-Франківській (Бурштинська), та Львівській (Добротвірська) областях. Теплоелектроцентралі розташовані в межах міст, виробляють тепло та забезпечують роботу центрального опалення в осінньо-зимовий період. Теплоелектроцентралі є особливо важливими об'єктами критичної інфраструктури обласних центрів та м. Києва. У гідроенергетиці особливе значення відіграє каскад ГЕС на Дніпрі: Дніпрогес, Каховська,

Кременчуцька, Київська, Канівська, Середньодніпровська. Побудовані ГЕС також на Дністрі (Дністровська), Росі, у Закарпатській області (Теребле-Ріцька). Частково реалізовано Південнобузький каскад ГЕС. Важливе значення у структурі джерел електроенергетики України відіграють АЕС: Південноукраїнська, Рівненська, Хмельницька, Запорізька [8].

Протягом 2016 - 2021 років завдяки стимулюючому “зеленому тарифу” активно розвивалася відновлювана енергетика. У травні 2021 було запущено першу в Україні промислову літій-іонну систему накопичення енергії (СНЕ) потужністю 1 МВт і ємністю 2,25 МВт·год. Проте на цей час понад 50% електроенергії в Україні виробляють АЕС. Теплоелектростанції є основними у забезпеченні електричною енергією в напівпікові та разом із ГЕС та ГАЕС у пікові години [9] (рис. 1.2).

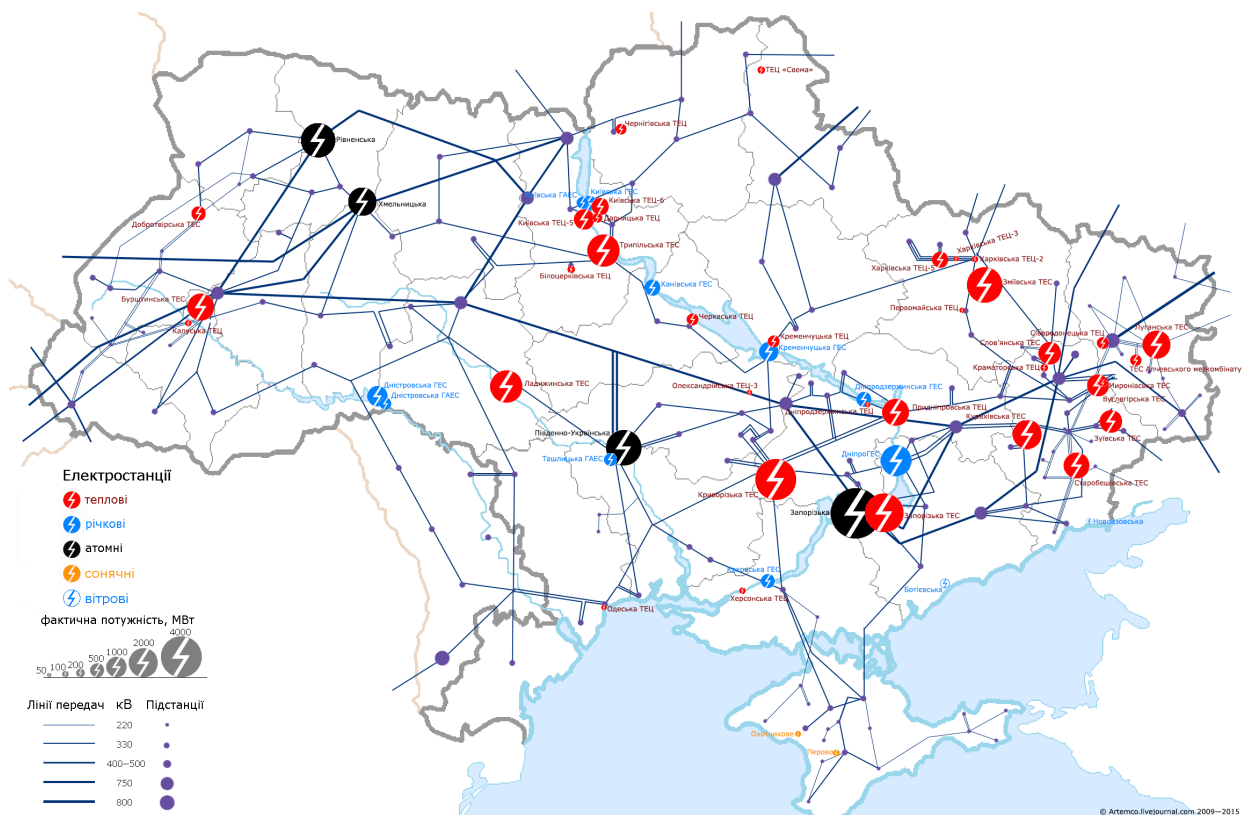


Рис. 1.2. Електростанції України фактичною потужністю більше 50 МВт

Крім генерації, важливою складовою енергетичної галузі України є транспортування і розподіл енергії, забезпечувані розподільчими станціями, лініями електропередач, сховищами, трубопроводами, залізничними шляхами тощо. Також мають істотне значення місця видобутку енергоресурсів, переробки, складування сировини, зберігання та захоронення відходів.

Основою електроенергетики країни є Об'єднана електроенергетична система, яка проводить централізоване електрозабезпечення внутрішніх споживачів. Об'єднана електроенергетична система взаємодіє з енергосистемами сусідніх держав, забезпечує експорт та імпорту електроенергії. До її складу входять чотири територіальні управління:

Північне, Східне, Південне, Західне. Об'єднана електроенергетична система України є мережею внутрішніх та міждержавних ліній електропередач і підстанцій напругою 220 - 750 кВ.

Станом на 2020 рік встановлено такі потужності енергетики України:

АЕС – 13,8 ГВт;

ТЕС – 21,8 ГВт;

ТЕЦ – 6,1 ГВт;

Відновлювані джерела – 6,7 ГВт;

ГЕС/ГАЕС – 6,3 ГВт.

Виробництво електричної енергії забезпечують найбільші власники теплових електростанцій ДТЕК, “Центренерго”, гідравлічних – “Укргідроенерго”, атомних – “Енергоатом”. Транспортування електричної енергії від виробників до розподільчих компаній оператор системи передачі Національна енергетична компанія “Укренерго”. Розподіляють електроенергію споживачам 32 оператори систем розподілу. Найбільшими за встановленою потужністю та річним виробництвом електроенергії є атомні електростанції: Запорізька – 6000 МВт, Південноукраїнська – 3000 МВт, Рівненська – 2880 МВт, Хмельницька – 2000 МВт.

Початок війни у 2014 році сильно позначився на енергетиці України і значну частину енергетичних об'єктів, ресурсної бази та систем розподілу було втрачено на тимчасово окупованих територіях Криму, частинах Донецької та Луганської областей, зокрема взимку 2014 року було завдано окремих ударів по ОКІ України в місцях бойових дій.

До початку 2022 року ОЕС України працювала синхронно (паралельно) з енергетичними системами Білорусі, РФ, Молдови, а одна її окрема частина Бурштинський енергоострів – з об'єднаною енергетичною системою континентальної Європи ENTSO-E. Це давало змогу експортувати електроенергію як у східному, так і в західному напрямках.

Повномасштабна агресія РФ, у тому числі з території підконтрольної їй Білорусі, зумовила необхідність значних організаційно-технічних змін у енергетиці України. Так, 24 лютого 2022 року Національна енергетична компанія “Укренерго” від'єднала українську енергосистему від мереж РФ та Білорусі. 16 березня 2022 року Енергосистеми України та Молдови було повністю синхронізовано з енергомережею континентальної Європи ENTSO-E [10]. Згідно повідомлення прес-служби Міністерства енергетики України від 08.04.2023 енергетичні відомства України та США разом за ініціативою “Net Zero World” почали підготовку програми співпраці з розвитку українського енергетичного сектору.

Газова промисловість – це галузь паливної промисловості. Основне її завдання – видобуток і розвідка природного газу, виробництво біометану та синтетичного метану, газопостачання по газопроводах, накопичення і сезонне зберігання у сховищах, переробка газу, використання його в різних галузях промисловості і комунально-побутовому господарстві. Серед

найважливіших завдань підприємств газової галузі – транспортування й облік газу [11].

Газотранспортна система України включає 36 тис. км магістральних газопроводів різного призначення і продуктивності, 71 компресорну станцію (122 компресорних цехи), понад 1600 газорозподільних станцій, 12 підземних сховищ газу. В Україні одна з найбільших у світі газотранспортних систем, з найбільшим в Європі після Росії активним обсягом газу – понад 32 млрд. м³, або 21,3% від загальноєвропейської активної ємності. Газотранспортна система виконує дві основні функції: забезпечення природним газом внутрішніх споживачів, а також транзит природного газу через територію України у країни Західної та Центральної Європи.

Система транспортування газу складається з газопроводів різних типів (магістральних, розподільних, перемичок); підземних сховищ газу, газорозподільних станцій, газорегуляторних пунктів, компресорних станцій, ділянок підведень та відведень.

Така складна газотранспортна система розрахована на виконання повного комплексу операцій з видобутку, зберігання, транспортування та розподілу газу [12; 13].

Нафтовидобувна промисловість України – це галузь паливної промисловості, підприємства якої розвідують і видобувають нафту та нафтовий газ, а також транспортують і зберігають нафту. Нафта й нафтовий газ – важлива сировина для хімічної та нафтохімічної промисловості.

Нафтопереробна промисловість – це галузь паливної промисловості, підприємства якої з сирової нафти виробляють різні нафтопродукти. Основною продукцією нафтопереробної промисловості є паливо для карбюраторних (авіаційні та автомобільні бензини), реактивних (авіаційний гас), дизельних (дизельне паливо) двигунів, котельне паливо (мазути), моторні оливи, спеціальні бітуми, парафіни, кокс для електродної промисловості, мастила тощо, всього – понад 300 найменувань [14]. Продукцію нафтопереробної промисловості також використовують підприємства нафтохімічної промисловості.

На окупованих у ході війни з РФ територіях залишилися об'єкти генерації та розподілу електроенергії, а головне – джерела ресурсів видобутку вугілля, природного газу, нафти, ядерного палива, шляхи транспортування наземним і річковим, морським транспортом, що вкрай негативно позначилося на енергетиці України.

Частину об'єктів вже звільнено в ході контрнаступу сил оборони України, зокрема об'єкти зберігання та захоронення відходів ядерної енергетики у Чорнобильській зоні, частина розподільчої інфраструктури у Харківській та Херсонській областях. Проте станом на кінець 2023 року значна частина енергосистеми України залишається під тимчасовим контролем противника. Найбільшою загрозою можна назвати окупацію збройними силами РФ Каховської ГЕС, Запорізької ТЕС та Запорізької АЕС, які крім безпосередньої провідної участі в енергогенерації України, є

об'єктами підвищеної техногенної та екологічної небезпеки. На цей час вказані об'єкти використовує противник з терористичною метою, їх обстрілює РФ, на них всупереч міжнародним конвенціям розміщені військовослужбовці РФ, вибухонебезпечні предмети тощо. Також залишається ризик нанесення ударів засобами повітряного нападу (ЗПН) противника по газопроводах, сховищах пального тощо, які можуть спричинити техногенні аварії та забруднення довкілля.

Значна частина об'єктів енергосистеми України зазнає регулярних обстрілів противника, в тому числі у глибині території, високоточними ЗПН. За оцінкою Єврокомісії, на цей час пошкодження об'єктів енергетики України наближаються до критичної межі [15]. Особливостями об'єктів енергетичної галузі України, які зумовлюють її уразливість до ЗПН противника можна назвати такі:

- застарілість фонду об'єктів, істотний моральний і технічний знос, необхідність ремонту й оновлення обладнання. Радянська побудова, спільна на той час сфера проєктування, виробництва і використання об'єктів зумовлюють високий рівень обізнаності противника і можуть бути використані для нападу;
- значна централізованість, використання великих потужностей і високих напруг (330 кВ, 440 кВ, 750 кВ) на станціях електрогенерації та передачі, що зумовлює труднощі і тривалість ремонтів, заміни елементів на об'єктах;
- географічне розташування великої кількості об'єктів безпосередньо біля головних напрямків ударів противника, лінії зіткнення та в цілому на відкритих територіях, що робить їх уразливими до нападу з повітря;
- малий ступінь використання альтернативних, локальних, розподілених та диверсифікованих джерел енергії;
- невідповідність об'єктів та системи загалом до загроз воєнного часу, відсутність належного активного та пасивного захисту, застарілість і надмірна централізація інфраструктури.

Далі розглянемо принципові технологічні схеми **основних об'єктів критичної інфраструктури енергетичної галузі** та їх найбільш важливі елементи.

1.2. Елементний склад окремих об'єктів – представників основних об'єктів критичної інфраструктури енергетичної галузі

Опишемо по чергово можливі критичні елементи для окремих типів об'єктів основних об'єктів критичної інфраструктури енергетичної галузі.

Атомні електростанції (АЕС) України мають енергоблоки потужністю 1000 МВт та 440 МВт, при цьому кожен реакторний блок розташований в окремій будівлі, має герметичну оболонку та власні системи захисту. Турбіни та генератори можуть бути розташовані у спільному

турбінному цеху. Основними компонентами енергоблоку атомної електростанції є (рис. 1.3):

- 1) реактор – основна частина електростанції, яка виробляє теплову енергію шляхом ядерного розщеплення;
- 2) турбіни, які використовують для перетворення теплової енергії, виробленої в реакторі, на механічну енергію. Це важлива та дороговартісна складова, оскільки турбіни містять багато високотехнологічних елементів;
- 3) генератори, призначені перетворювати механічну енергію, створену турбінами, на електричну енергію;
- 4) блочні трансформатори – пристрої, що перетворюють (підвищують) напругу та забезпечують видачу електроенергії від генераторів станції у високовольтну мережу через лінії електропередачі;
- 5) пункт управління та контрольно-вимірювальні системи – використовують для керування роботою станції і забезпечення безпеки її експлуатації. До таких систем можуть входити комп'ютери, мережі, сервери, а також радіаційні, температурні, тискові та інші датчики, які допомагають виявляти і контролювати будь-які відхилення у роботі електростанції;
- 6) система охолодження реактора та інших частин електростанції;
- 7) системи безпеки, які допомагають уникнути надзвичайних ситуацій під час експлуатації атомної електростанції – системи раннього попередження про аварії, системи евакуації і рятування, системи захисту від радіації та інші;
- 8) місця зберігання ядерного палива та відходів. Ці елементи не впливають прямо на роботу АЕС, але їх пошкодження може призвести до значних екологічних наслідків та вплинути на стан здоров'я персоналу.

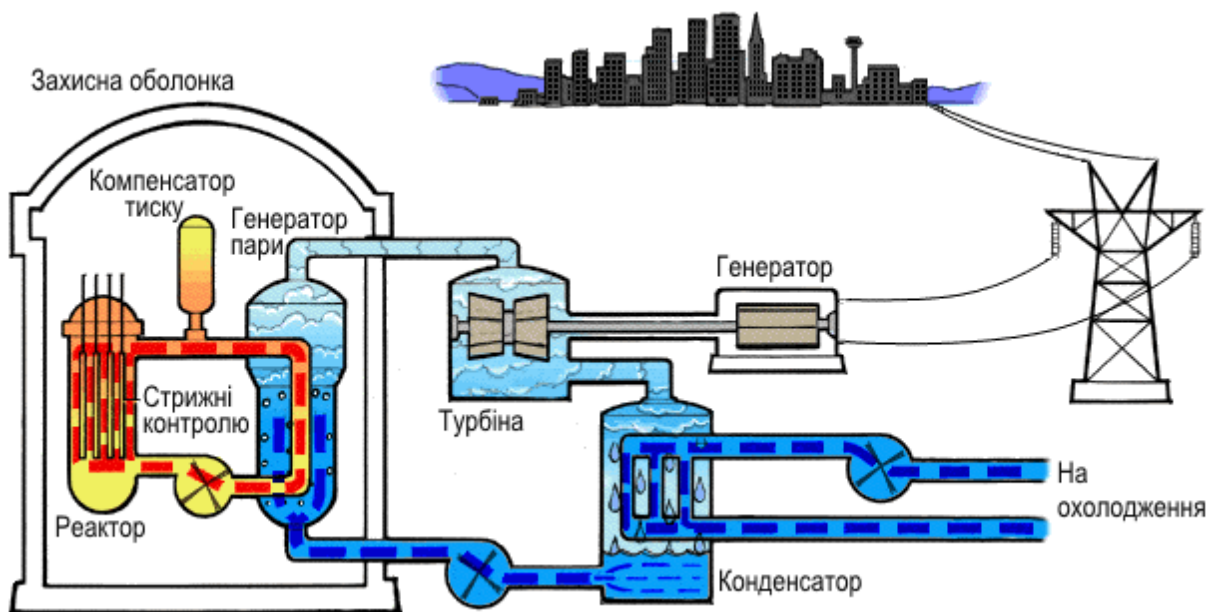


Рис. 1.3. Принципова технологічна схема роботи атомної електростанції

Найбільш критичні елементи атомної електростанції – це реактор, турбіни, генератор, трансформатори та контрольно-вимірювальні системи з

пунктом управління. Саме ці елементи потребують першочергового інженерного захисту.

Теплові електростанції (ТЕС) України побудовані за блочним принципом. Енергоблоки потужністю 100, 150, 200 та 300 МВт розташовані по два-чотири в межах спільних споруд. Частина ТЕС мають по 2 або 3 черги – окремі будівлі, введені в експлуатацію в різні періоди. В нашій країні використовують вугільні енергоблоки ТЕС, що як допоміжне або резервне паливо можуть спалювати мазут і газ. Також експлуатують невелику кількість газових енергоблоків ТЕС.

Теплові електростанції на вугіллі працюють за принципом використання тепла, яке виробляється під час згоряння вугілля, для перетворення води в пар і обертання турбін, що приводять у рух генератор, який виробляє електроенергію.

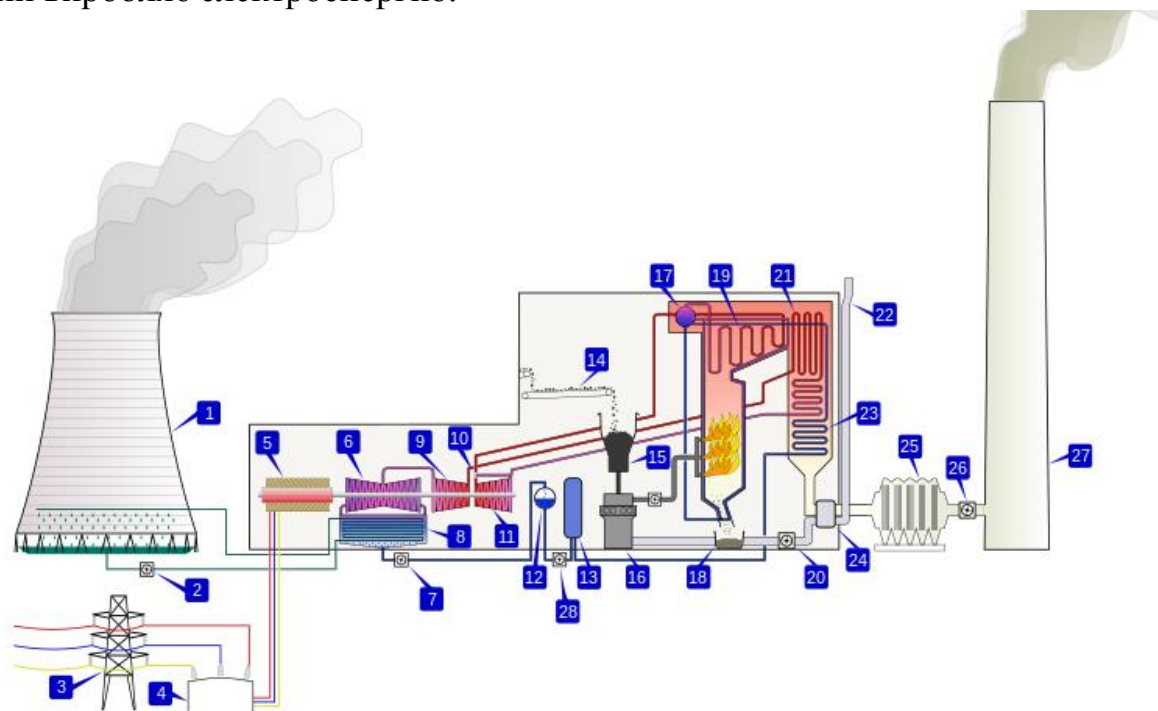


Рис. 1.4. Принципова технологічна схема роботи теплової електростанції на вугіллі [16]:

1 – Охолоджувач пари; 2 та 7 – Водні насоси; 3 – Високовольтна лінія; 4 – Підвищувальний трансформатор; 5 – Електричний генератор (3-фазний); 6 – Турбіна низького тиску; 8 – Збірник конденсату; 9 – Турбіна середнього тиску; 10 – Клапан контролю пари; 11 – Турбіна пари високого тиску; 12 – Водяний дозатор; 13 – Водяний нагрівач; 14 – Конвеєр для вугілля; 15 – Бункер для вугілля; 16 – Вугільний пульверизатор; 17 – Паровий котел; 18 – Бункер для золи; 19 – Головний контур теплообмінника; 20 – Насос гарячого повітря; 21 – Вторинний контур теплообмінника; 22 – Вхідна труба для повітря; 23 – Первинний контур теплообмінника; 24 – Повітряний теплообмінник; 25 – Фільтрувальна установка; 26 – Витяжний вентилятор; 27 – Димова труба

Основними елементами теплової електростанції на вугіллі є (рис.1.4):

1) Котли, де відбувається згорання вугілля та перетворення води на пару.

2) Турбіни, які використовують для перетворення теплової енергії, виробленої в котлах, на механічну енергію.

3) Генератори, які перетворюють механічну енергію, створену турбінами, на електричну.

4) Трансформатори та розподільчі пристрої – електротехнічне обладнання, що забезпечує видачу електроенергії від генераторів станції у високовольтну мережу через лінії електропередачі.

5) Система подачі палива – включає вугільні склади, транспортні засоби для перевезення вугілля, системи підготовки і транспортування його до котлів.

6) Система подачі резервного/допоміжного палива – включає ємності для мазуту, трубопроводи, паливні насоси та інші компоненти, необхідні для подачі рідкого палива до котлів.

7) Система очищення вихлопних газів – забезпечує зменшення викидів в атмосферу, а також затримання шкідливих речовин.

8) Система охолодження турбін та інших частин електростанції.

9) Пункт управління і контролю за роботою станції.

Теплові електростанції на природному газі працюють за принципом використання газу, який згорає в газових турбінах або котлах, перетворюючи тепло на механічну енергію, щоб надалі її використовувати для генерації електроенергії.

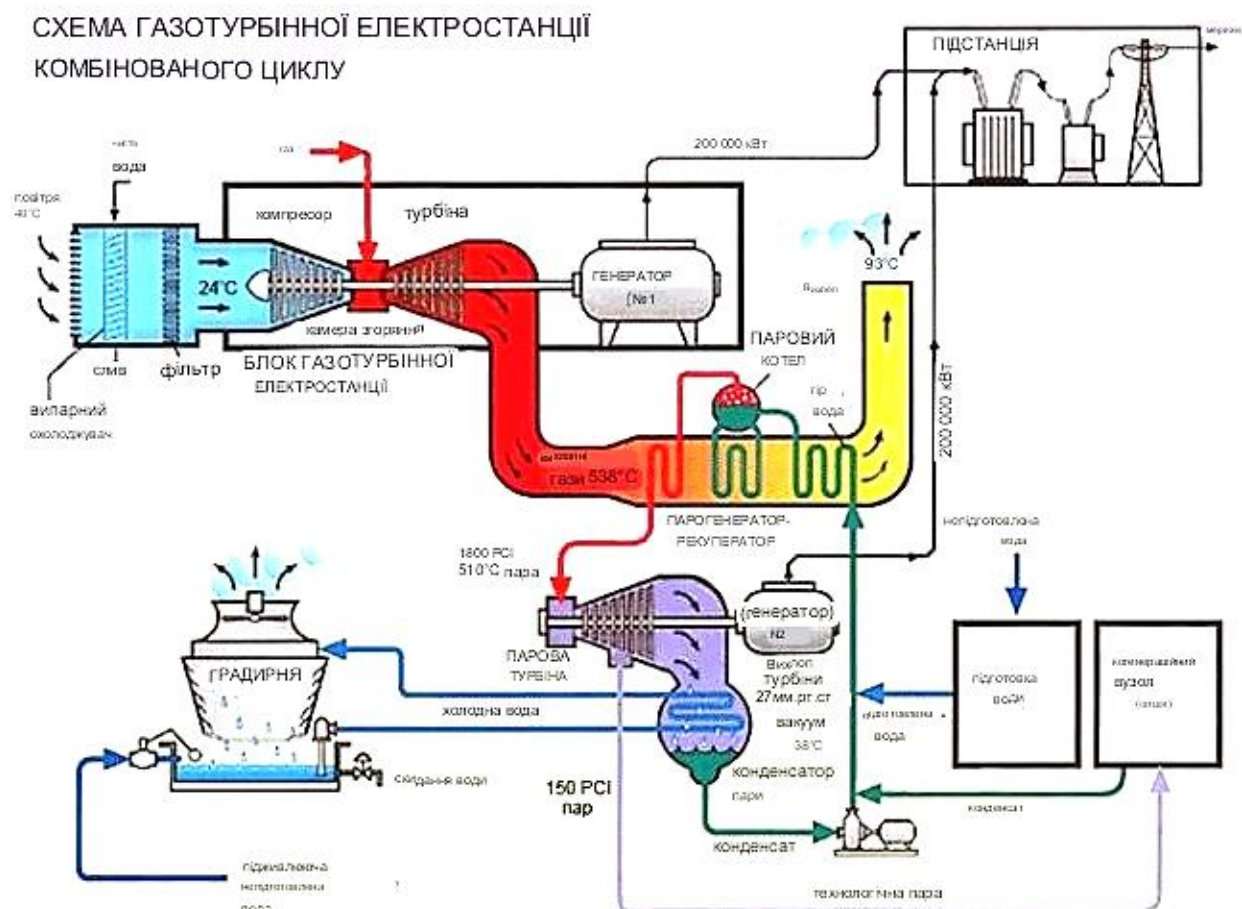


Рис. 1.5. Принципова технологічна схема роботи теплової електростанції на газі

Основними елементами теплової електростанції на природному газі є (рис. 1.5):

1) Газові турбіни або котли, де відбувається згоряння газу та перетворення тепла на механічну енергію.

2) Генератори, які перетворюють механічну енергію, створену газовими турбінами або котлами, на електричну енергію.

3) Трансформатори та розподільчі пристрої – електротехнічне обладнання, що забезпечує видачу електроенергії від генераторів станції у високовольтну мережу через лінії електропередачі.

4) Системи подачі газу, що включають в себе газові трубопроводи, компресорні станції та інші компоненти, які необхідні для подачі газу до газових турбін або котлів.

5) Системи очищення газу від забруднювачів, таких як сірчистий газ, аміак, оксиди азоту тощо.

6) Системи охолодження газових турбін та інших частин електростанції.

7) Пункт управління і контролю за роботою станції.

На мультитопливних ТЕС використовують як вугілля, так і газ, мазут чи інші джерела палива, що комбіновано містять складові важливих елементів з-поміж наведених вище. Більшість енергоблоків ТЕС України є мультитопливними.

Найкритичнішими елементами теплової електростанції є котли, в яких відбувається згорання палива, турбіни, генератори, трансформатори та пункти управління.

Теплоелектроцентрально (ТЕЦ) – це теплова електростанція, яка виробляє одночасно електроенергію й тепло у вигляді гарячої води та пари. При цьому тепло та пара можуть бути використані як для промисловості, так і для побутових потреб (централізованого опалення та гарячого водопостачання).

Найкритичніші елементи, які входять до складу теплової теплоелектроцентрально, включають елементи ТЕС, наведені вище, а також додані до них устаткування контурів відведення теплоносіїв для теплового живлення споживачів, що треба враховувати під час проєктування інженерного захисту.

Гідроелектростанції (ГЕС) – це електростанції, які за допомогою гідротурбін перетворюють потенційну кінетичну енергію утримуваної греблею води в обертальний рух генераторів, що виробляють електричну енергію. Гідроелектростанцію, будівля якої є частиною греблі, називають русловою (наприклад, Кременчуцьку, Київську ГЕС). Якщо будівля розташована окремо, біля основи греблі на протилежному від водосховища боці, таку ГЕС називають пригреблевою (наприклад, ДніпроГЕС).

Найкритичнішими елементами гідроелектростанції є (рис. 1.6):

1) Гідротурбіни – основні компоненти генераторів електроенергії, що забезпечують перетворення енергії руху води в електричну енергію.

2) Регулювальні ворота – рухомі частини гребель, що контролюють рівень води в водосховищі та регулюють потік води до турбін.

3) Генератори – пристрої, які перетворюють механічну енергію, вироблену турбінами, на електричну енергію.

4) Греблі – споруди, що забезпечують створення водосховища та регулюють потік води до турбін.

5) Трансформатори – пристрої, які перетворюють напругу електроенергії на рівень, який може бути переданий через лінії електропередачі.

6) Керувально-вимірювальний пункт – системи управління станцією, прилади, які вимірюють та контролюють параметри її роботи, такі як тиск, температуру, рівень води, потужність та ефективність генераторів.



Рис. 1.6. Принципова технологічна схема роботи гідроелектростанції

Гідроакумулюючі електростанції (ГАЕС) – гідроелектричні станції, які використовують для вирівнювання добового графіка навантаження енергосистеми за рахунок здатності до накопичення, зберігання та вивільнення потенційної енергії води. Залежно від стану виробництва електроенергії в енергосистемі ГАЕС може бути як терміновим генератором електроенергії, так і споживачем, що виконує важливу функцію балансування роботи енергосистеми (рис.1.7).

Гідроакумулюючі електростанції з оборотними гідроагрегатами, що працюють як генератори струму або водяні помпи, в години малого споживання електроенергії перекачують воду з водосховища у верхній басейн, а в години пікових навантажень – вивільняють накопичену воду та виробляють енергію як звичайні ГЕС (наприклад, Київська ГАЕС, Дністровська ГАЕС).

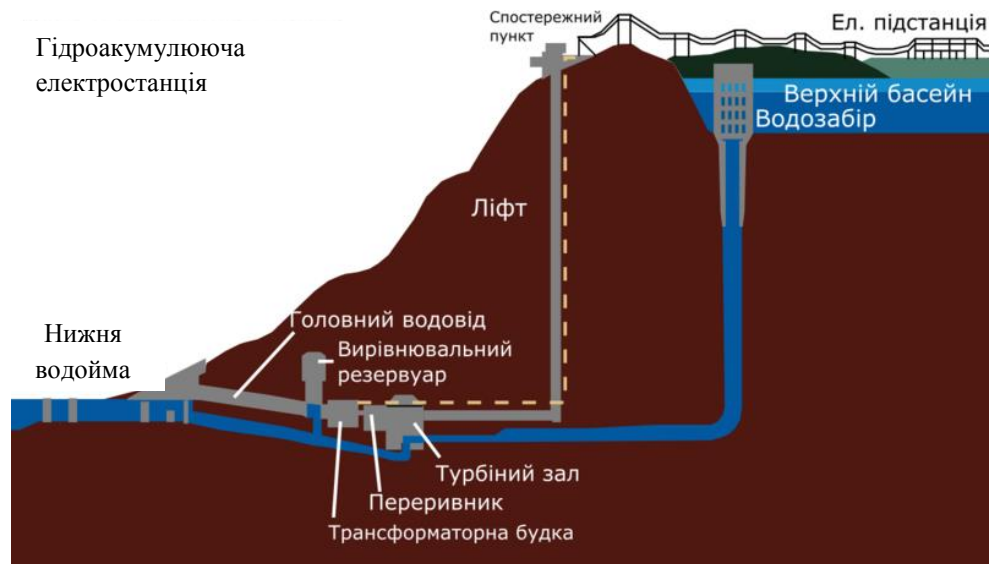


Рис. 1.7. Принципова технологічна схема роботи ГАЕС

Найкритичніші елементи гідроакумуючої електростанції майже тотожні таким як у ГЕС, проте з урахуванням гідроспоруд, розташованих на підвищенні та технологічного ланцюжка закачування води для акумулювання енергії – електродвигунів, запірних заслінок та ін.

Таким чином, ми описали всі основні критичні елементи для станцій генерації електроенергії. Важливо зазначити, що конкретні елементи та їх характеристики можуть залежати від конструкції і типу ОКІ. Спільними уразливими елементами для АЕС, ТЕС, ГЕС та ГАЕС є блочні трансформатори. Відмова блочного трансформатора на електростанції перериває видачу потужності генератора та зупиняє роботу енергоблоку.

Під час проєктування інженерного захисту ОКІ слід також враховувати, що противник може завдати ударів не по генеруючих пристроях, а по розподільчих, по вузлах електричної мережі або суміжній інфраструктурі, наприклад лініях електропередачі, системах постачання ОКІ необхідними матеріалами, паливом, місцях складування чи вивезення відходів за межами ОКІ.

Розподільчі підстанції – це електроустановки, призначені для перетворення та розподілу електричної енергії. Залежно від призначення підстанції можуть бути трансформаторними (ТП) або перетворювальними (ПП). Трансформаторні підстанції призначені для перетворення електричної енергії однієї напруги в енергію іншої напруги за допомогою трансформаторів. Перетворювальні підстанції призначені для перетворення роду струму або його частоти. Електричний розподільчий пристрій, що не входить до складу підстанції, називають розподільчим пунктом (рис. 1.8).

За місцем розміщення підстанції поділяють на відкриті, устаткування яких розташоване на відкритих майданчиках, та закриті, обладнання яких розташоване в будівлях або спорудах. При цьому електропідстанції можуть бути розташовувані в закритих приміщеннях (ЗТП – закрыта трансформаторна підстанція), під землею і на опорах (ЩТП – щоголова

трансформаторна підстанція) або у спеціальних приміщеннях будівель-споживачів [17].

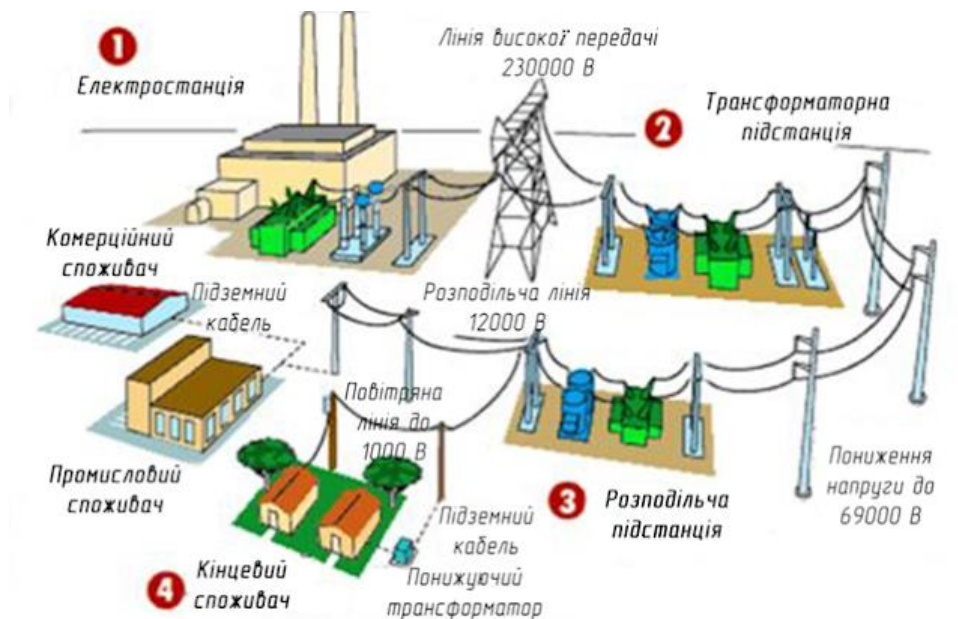


Рис. 1.8. Принципова технологічна схема роботи централізованої каскадної енергосистеми і місце у ній передавальних (2) та розподільчих (3) підстанцій

Найкритичнішими елементами електричних підстанцій зазвичай є (рис. 1.9):

1) Трансформатори, автотрансформатори, силові автотрансформатори, трансформатори власних потреб. Їх використовують для перетворення напруги на різних рівнях мережі, і вони є одними з найбільш критичних компонентів. Відмова трансформатора може призвести до падіння потужності та значних перерв в електроживленні споживачів.

2) Загальнопідстанційний пункт керування – включає системи безпеки та контролю, автоматичні захисні механізми, які відключають електричну мережу у разі виявлення несправностей або надмірного навантаження; комунікаційні системи, що забезпечують зв'язок з операторами та контрольно-вимірювальними пристроями для ефективного управління підстанцією та виявлення неполадок. Контрольно-вимірювальні пристрої фіксують параметри електричної мережі (напругу, струм, потужність та інші характеристики), їх точність важлива для ефективного управління електропостачанням.

3) Гнучкі системи передачі змінного струму (ГЗПЗ / FACTS) – пристрої потужної силової електроніки, об'єднані з електротехнічним обладнанням (конденсаторними батареями, шунтуючими реакторами), що дають змогу збільшити пропускну здатність мережі, знизити втрати електроенергії під час її трансформації, поліпшити якість електроенергії.

4) Відкриті розподільчі пристрої і установки – використовують для розподілу електроенергії в різних гілках мережі, вони мають бути надійні та здатні витримувати великі навантаження. До складу розподільчих установок

входять вимикачі, роз'єднувачі, трансформатори струму і напруги, вимірювальні прилади, збірні шини, розрядники, електричні реактори.

5) Релейний захист та автоматика обладнання – використовують для контролю за електропостачанням, переключення на ізольовані ділянки та автоматичного відключення у разі несправності. Відіграють важливу роль у забезпеченні захисту мережі.

6) Компресорні станції – установки для забезпечення стисненим повітрям основного обладнання (вимикачів).



Рис. 1.9. Характерні елементи підстанцій: *а* – загальнопідстанційний пункт керування; *б* – шунтуючий реактор; *в* – релейний захист; *г* – відкриті розподільчі пристрої

До об'єктів критичної **газової інфраструктури** належать насамперед компресорні станції, газорозподільчі станції, сховища газу, газові свердловини, підприємства з переробки газового конденсату. Сховища газу можуть бути наземними або підземними (ПСГ), які найбільш поширені в Україні. Найкритичнішими елементами об'єктів газової промисловості зазвичай є (рис.1.10):

1) Устаткування для видобування і переробки газу і конденсату, які включають газопроводи, трубопроводи та ємності для конденсату, компресорні станції і трансформатори.

2) Центральні пункти керування – включають диспетчерські й операторні, призначені для загального керування технологічними процесами підприємства.

3) Газотурбінні агрегати – зовнішні споруди у блочно-контейнерному виконанні, головний технологічний вузол із перекачування природного газу.

4) Вузли очищення газу – на газорозподільчих станціях (ГРС) призначені для запобігання потраплянню механічних домішок і рідин у технологічні трубопроводи, обладнання, засоби контролю й автоматики ГРС та у вихідні газопроводи після ГРС.

5) Теплообмінники, апарати повітряного охолодження, які є системою взаємопов'язаних технологічних апаратів теплової підготовки та тепломасообміну.

6) Блоки підготовки паливного, пускового, імпульсного газу; газосепаратори; установки комплексної підготовки, призначені для підготовки газу, який перекачують компресорними станціями магістральних газопроводів, для використання його як паливного газу.

7) Вузли підключення компресорних станцій (КС) – споруди із труб, деталей, арматури, щільно поєднаних між собою, призначені забезпечувати потрібні технічні умови для транспортування газу магістральним газопроводом.

8) Газгольдери та інші резервуари для надземного зберігання газу та продуктів газової промисловості.



Рис. 1.10. Розташування ПСГ в Україні

Газові сховища в Україні досить уразливі до впливу ЗПН противника, тому що значна їх частина розташована на сході і півночі країни (рис.1.11).

Підприємства **нафтової галузі** включають такі критичні елементи:

1) Котли НПЗ для теплової обробки нафти й інших матеріалів. Вони мають велику потужність, потребують високого рівня безпеки та регулярного технічного обслуговування.

2) Дистиляційні колони НПЗ для розділення нафти на різні фракції за кипінням, мають складну конструкцію та велику висоту, що потребує дотримання суворих стандартів безпеки і стабільності роботи.

3) Реактори, які використовують для хімічних процесів переробки нафти, можуть бути підвищеної температури і тиску, що створює високі ризики для персоналу та довкілля.

4) Нафтобази – підземні та надземні ємності нафти і пально-мастильних матеріалів, призначені для зберігання значних обсягів нафти та інших паливних матеріалів, що створює ризик вибухів, пожеж і забруднення довкілля в разі аварій.

5) Трубопроводи – використовують для транспортування нафти і нафтопродуктів на великі відстані.

6) Охолоджувальні системи НПЗ – призначені підтримувати оптимальні умови роботи і запобігати перегріву обладнання.

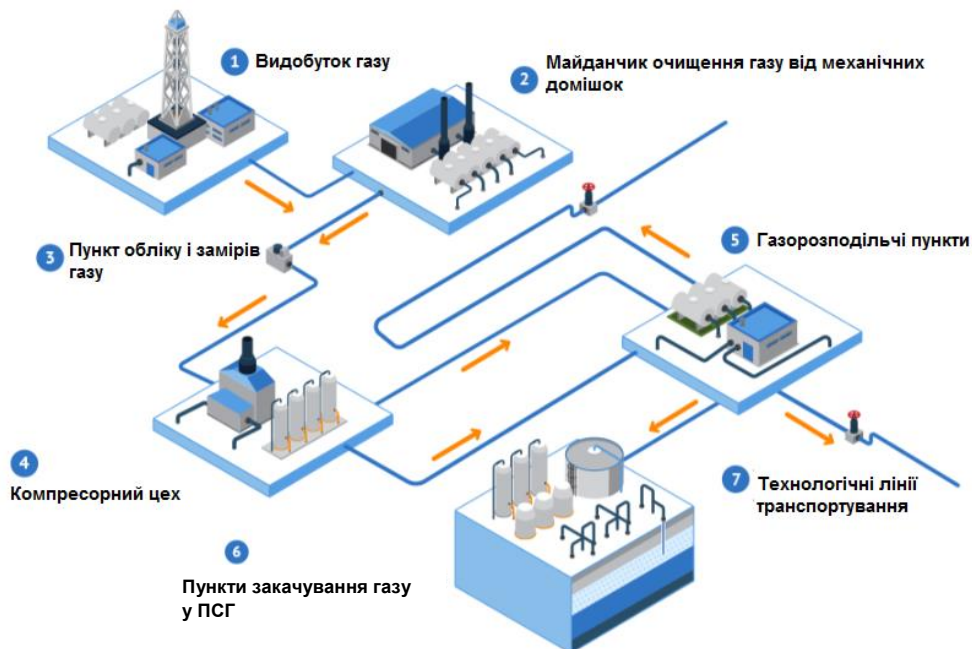


Рис. 1.11. Схематично відображено місце ПСГ у частині газової мережі

Як відомо зі статистики влучань ЗПН, саме надземні резервуари найчастіше стають цілями ударів противника, тому що містять великі обсяги зосередженого в одному місці готового продукту, на вироблення якого витрачені значні зусилля та ресурси, що в разі ураження призводить до одномоментних істотних втрат, а горючість і вибухонебезпечність продуктів та їх похідних значно ускладнює усунення наслідків ударів та примножує супутні втрати. Крім того, великі розміри і, як правило, металева листовая конструкція резервуарів полегшує прицілювання ЗПН та ускладнює виконання заходів інженерного захисту (рис. 1.12).

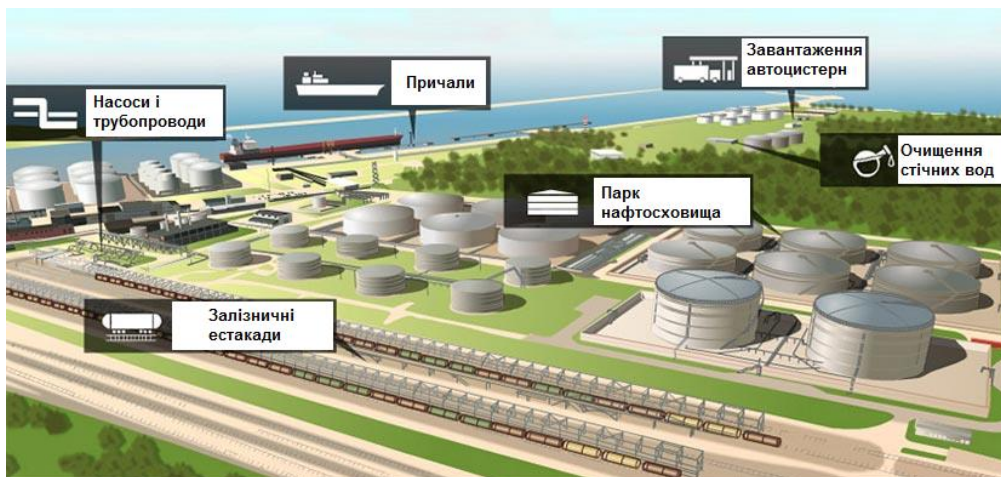


Рис. 1.12. Приклад вигляду та основних складових бази зберігання нафти або нафтопродуктів

Сонячні та вітрові станції, інші підгалузі альтернативної енергетики в цій праці не розглядатимемо, тому що нажаль їх частка у загальному первинному постачанні енергії в Україні невелика. З іншого боку, через малу питому потужність, розподіленість і диверсифікацію по території країни альтернативна енергетика не стає ціллю для противника, і не може стати через відсутність централізації. Можлива точкова руйнація окремих елементів альтернативної енергетики ракетними ударами або безпілотними літальними апаратами (БПЛА) противника не призводить до істотного зниження виробництва енергії за рахунок розподіленості по території та паралельних зв'язків між їх складовими, а також відсутності чітко відокремленої бази ресурсів та логістичних ланцюжків їх постачання. Крім того, пошкодження об'єктів складових альтернативної енергетики не призводить до важких екологічних наслідків, які у разі ударів по складових традиційної енергетики є дуже значними. Все це вказує на перспективність новітніх напрямів диверсифікованого та розподіленого енерговидобутку із відновних джерел для побудови сталої енергетичної системи країни в умовах перманентних воєнних загроз.

1.3. Нормативна база класифікації та захисту критичної інфраструктури

Інфраструктура (від лат. *infra* – “нижче”, “під” і лат. *structura* – “будівля”, “розташування”) – це сукупність споруд, будівель, систем і служб, необхідних для функціонування галузей матеріального виробництва та забезпечення умов життєдіяльності суспільства. Розрізняють виробничу (дороги, канали, порти, склади, системи зв'язку тощо) і соціальну (школи, лікарні, бібліотеки, театри, стадіони та ін.) інфраструктуру [18].

З воєнної точки зору інфраструктура є життєво необхідною сполучною ланкою, що охоплює основні “кільця цілей”, на що вперше звернув увагу полковник армії США Д. Уорден у 1988 році [19]. В сучасних умовах глобалізації інфраструктура виходить за межі кілець військових цілей,

поєднана з іншими країнами, віртуальним середовищем і т.п. (рис. 1.13, а), що вказує на її важливість і критичний вплив. Сучасне розуміння інфраструктури як частини системи забезпечення цілей відводить їй провідну роль у операційному середовищі (рис. 1.13, б).

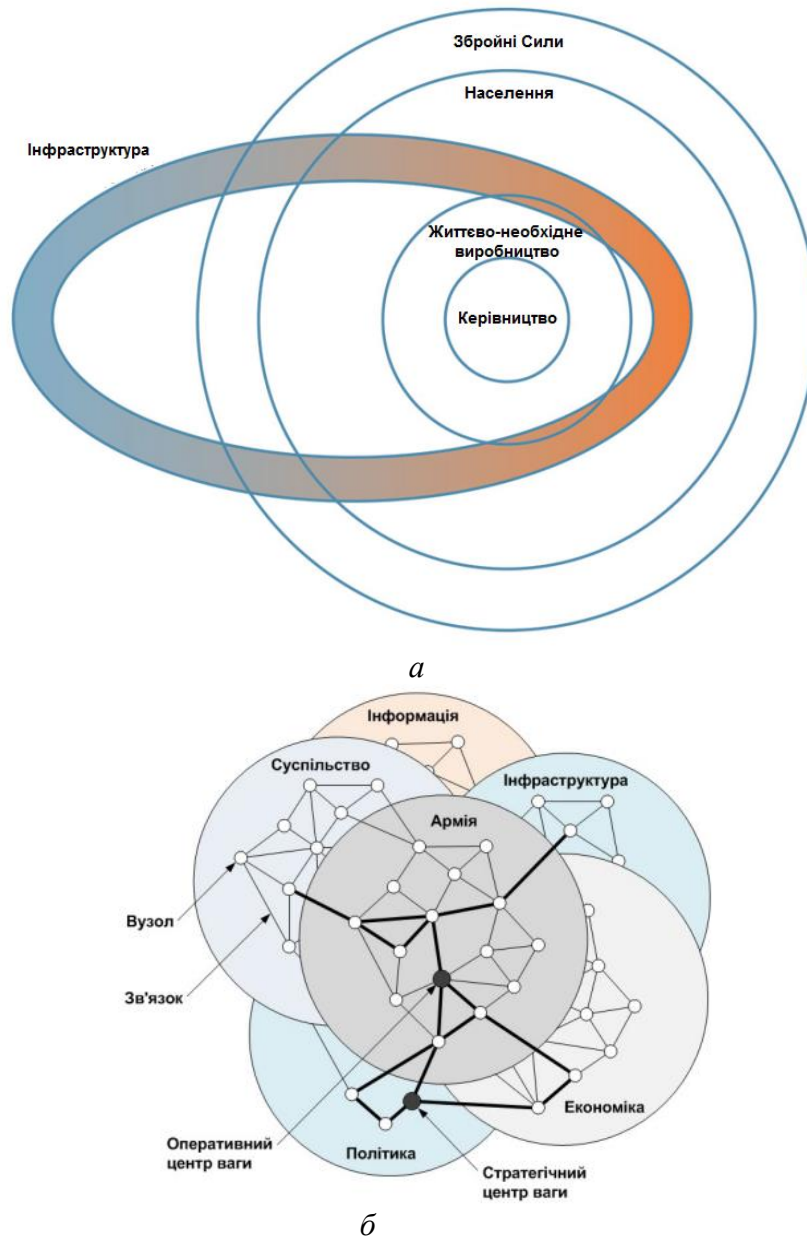


Рис. 1.13. Провідне місце інфраструктури у “кільцях” воєнних цілей Д. Уордена (а), взаємопов’язане операційне середовище (б) [33]

В Україні Законом “Про критичну інфраструктуру” [20] визначено, що **об’єкти критичної інфраструктури** – це системи інфраструктури, їх частини та сукупність, які є важливими для економіки, національної безпеки та оборони, порушення функціонування яких може завдати шкоди життєво важливим національним інтересам. До них відносяться зокрема підприємства та установи (незалежно від форми власності) таких галузей, як енергетика, хімічна промисловість, транспорт, банки та фінанси, інформаційні технології і телекомунікації (електронні комунікації), продовольство, охорона здоров’я,

комунальне господарство, що є стратегічно важливими для функціонування економіки і безпеки держави, суспільства та населення, виведення з ладу або руйнування яких може вплинути на національну безпеку й оборону, природне середовище, призвести до значних матеріальних та фінансових збитків, людських жертв. Законом України визначено термін “критично важливі об’єкти інфраструктури” – юридичні особи, діяльність яких безпосередньо пов’язана з технологічними процесами та/або наданням послуг, що мають велике значення для економіки та промисловості, функціонування суспільства та безпеки населення, виведення з ладу або порушення функціонування яких може негативно вплинути на стан національної безпеки й оборони України, навколишнього природного середовища, заподіяти майнову шкоду та/або становити загрозу для життя і здоров’я людей [21].

Удари по ОКІ зумовлюють виникнення на них надзвичайних ситуацій (НС) – подій із порушення нормальних умов життя і діяльності людей, що призвели або можуть призвести до людських і матеріальних втрат. Також у Законі України “Про критичну інфраструктуру” [20] визначено важливе поняття “стійкості критичної інфраструктури” – стан критичної інфраструктури, за якого забезпечено її спроможність функціонувати у штатному режимі, адаптуватися до постійно змінюваних умов, протистояти і швидко відновлюватися після впливу загроз будь-якого виду.

Державна політика у сфері захисту критичної інфраструктури ґрунтується на таких засадах [20]:

- 1) визнання необхідності забезпечення безпеки та стійкості критичної інфраструктури;
- 2) визначення законодавчих вимог до принципів і підходів захисту критичної інфраструктури, пріоритетів, стратегічних завдань у цій сфері;
- 3) визначення суб’єктів національної системи захисту критичної інфраструктури, їх повноважень і засад відповідальності, порядку взаємодії;
- 4) створення умов та впровадження заходів, спрямованих на ефективне зниження і контроль за ризиками безпеки, зниження ризику реалізації можливих загроз, ліквідацію та/або мінімізацію наслідків реалізованих загроз, кризових ситуацій та інших їх видів;
- 5) створення системи раннього виявлення загроз критичній інфраструктурі;
- 6) запровадження державно-приватного партнерства, взаємодії суб’єктів господарювання та населення з питань забезпечення захисту і стійкості критичної інфраструктури;
- 7) забезпечення міжнародного співробітництва у сфері захисту критичної інфраструктури;
- 8) створення умов для швидкого відновлення життєво важливих функцій та надання послуг у разі реалізації загроз і порушення функціонування критичної інфраструктури.

У Євросоюзі загальноєвропейський підхід до захисту критичної інфраструктури задекларовано в повідомленні Європейської Комісії № 786 від 2006 року. Згідно з цим документом, до загальноєвропейської критичної інфраструктури належать ті елементи національних критичних інфраструктур країн-членів ЄС, відмова, інцидент або атака на які може значно впливати і на країну, в якій ця подія відбудеться, і хоча б на одну з інших країн-членів ЄС. Згаданим повідомленням започатковано Європейську програму із захисту критичної інфраструктури, розроблену задля підвищення рівня її захищеності завдяки створенню спільного підходу до її захисту в країнах-членах ЄС і гармонізації національних законодавств у згаданій сфері [23].

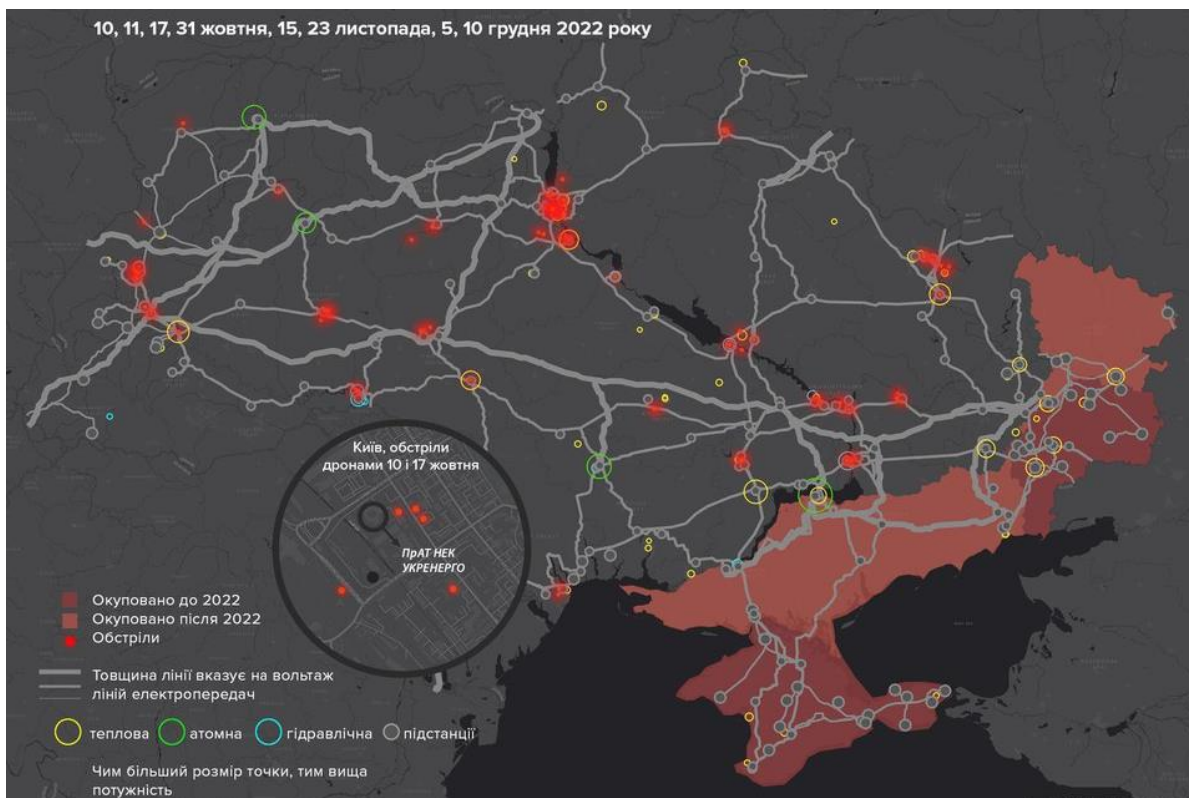


Рис.1.14. Мапа масованих ударів рф проти об'єктів енергетичної критичної інфраструктури України до грудня 2022 року [22]

Забезпечення безпеки критичної інфраструктури є складною проблемою для кожної держави і, посиляючись на думку американського дослідника Т. Льюїса [24], головними викликами можна назвати такі: значущість кожного із секторів критичної інфраструктури та її самої в цілому; управління безпекою за умов взаємозалежності діяльності урядових органів, державного і приватного секторів, регулюючих та економічних чинників; обмін інформацією, який уже на стадії збирання і зіставлення необхідних даних є значною проблемою, оскільки державні органи є здебільшого вертикально орієнтованими структурами, які накопичують інформацію, а елементи критичної інфраструктури розпорошені між державою та чималою кількістю приватних компаній; взаємозалежність

елементів і секторів критичної інфраструктури внаслідок притаманних їм комплексних різнорівневих взаємодій та взаємозв'язків. Зважаючи на те, що більшість систем критичної інфраструктури має мережеву архітектуру, Т. Льюїс вважає, що захищати необхідно передусім головні “вузли” цих систем [24]. Можна переконатися, що саме за цією стратегією діяла РФ, завдаючи ударів по критичній інфраструктурі України у 2022-2023 рр. (рис. 1.14).

У Сполучених Штатах Америки Міністерство оборони є головним ідеологом розроблення й розвитку технічних засобів, інформаційних і телекомунікаційних технологій для застосування глибоко ешелонованого захисту (defense-in-depth), зосередженого на інфраструктурі [23].

Об'єкти зараховують до критичної інфраструктури в порядку, встановленому Кабінетом Міністрів України [21], за сукупністю критеріїв, що визначають їх соціальну, політичну, економічну, екологічну значущість для забезпечення оборони країни, безпеки громадян, суспільства, держави і правопорядку, зокрема для реалізації життєво важливих функцій та надання послуг. Визначення певних об'єктів як ОКІ – вказує на існування загроз для них, можливість виникнення кризових ситуацій через несанкціоноване втручання в їх функціонування або його припинення, людський чинник чи природні лиха, тривалість робіт для усунення таких наслідків до повного відновлення роботи у штатному режимі.

До таких критеріїв належать:

1) виконання функцій із забезпечення життєво важливих національних інтересів;

2) існування викликів і загроз, для ОКІ;

3) ймовірність завдання значної шкоди нормальним умовам життєдіяльності населення;

4) уразливість ОКІ, тяжкість можливих негативних наслідків, заподіяння значної шкоди здоров'ю населення (кількість постраждалих, загиблих та осіб, які зазнали значних травм, а також чисельність евакуйованого населення); шкоди соціальній сфері (руйнація систем соціального захисту населення і надання соціальних послуг, втрата спроможності держави задовольнити критичні потреби суспільства); шкоди державному суверенітету (зниження обороноздатності, дискредитація іміджу країни, дестабілізація системи державного управління та унеможливлення виконання державою своїх функцій); шкоди економіці (вплив на внутрішній валовий продукт, розмір економічних втрат, як прямих, так і непрямих), природним ресурсам загальнодержавного та місцевого значення;

5) масштабність негативних наслідків для держави, які впливають на діяльність стратегічно важливих об'єктів для кількох секторів життєзабезпечення чи призводять до втрати унікальних національно значущих активів, систем і ресурсів, матимуть тривалі наслідки для держави і позначаються на діяльності інших секторів;

6) тривалість ліквідації таких наслідків і подальший негативний вплив на інші сектори держави;

7) вплив на функціонування суміжних секторів критичної інфраструктури.

Законодавством встановлено такі категорії критичності об'єктів критичної інфраструктури:

I – особливо важливі об'єкти, які мають загальнодержавне значення, значно впливають на інші об'єкти критичної інфраструктури; їх порушення функціонування призведе до виникнення кризової ситуації державного значення;

II – життєво важливі об'єкти, порушення функціонування яких призведе до виникнення кризової ситуації регіонального значення;

III – важливі об'єкти, порушення функціонування яких призведе до виникнення кризової ситуації місцевого значення;

IV – необхідні об'єкти, порушення функціонування яких призведе до виникнення кризової ситуації локального значення.

Постановою КМУ від 09.10.2020 № 1109 [25] визначено порядок зарахування об'єктів до критичної інфраструктури, в тому числі в паливно-енергетичному секторі, зокрема для електроенергетики наведено такий перелік категоризованих послуг: виробництво електричної енергії, забезпечення функціонування ринку електричної енергії, організація купівлі-продажу електричної енергії на ринку, управління системами передачі та енергопостачання, розподіл електричної енергії; для підсектору вугільно-промислового комплексу: видобуток енергетичного вугілля для генерації електроенергії на теплоелектростанціях і теплоелектроцентралях зберігання та постачання вугілля; у підсекторі газової промисловості – видобуток газу, переробку та очищення газу, передачу (транзит) газу, розподіл газу, забезпечення роботи систем зрідження природного газу, експлуатацію газотранспортної системи, зберігання природного газу та забезпечення роботи систем зрідження природного газу.

Для сектору ядерної енергетики визначено такий порядок зарахування об'єктів до критичної інфраструктури за сферами: виробництво ядерного палива, експлуатація ядерних підкритичних установок, ядерних реакторів, які включають критичні та підкритичні збірки дослідних реакторів, експлуатація атомних електростанцій, підприємств та установок зі збагачення та переробки палива, а також сховищ відпрацьованого палива.

Методикою категоризації об'єктів критичної інфраструктури, що є додатком до постанови [25], передбачено бальне оцінювання об'єкта залежно від таких його показників, як чинник негативного впливу в секторі/підсекторі та рівень негативного впливу, який може набирати для енергоструктури України таких значень: катастрофічні наслідки, критичні наслідки або незначні наслідки. Рівні залежать від можливих впливів надзвичайних ситуацій, наприклад: припинення електропостачання; зменшення постачання нафти та нафтопродуктів для споживання на внутрішньому ринку України; знищення, пошкодження або порушення функціонування об'єкта критичної інфраструктури, внаслідок чого може бути припинено постачання газу.

Кількісними показниками для обчислення балів для різних показників є **кількість** жителів, для споживачів певної категорії – обсяг території, яку зачеплено наслідками надзвичайної ситуації, час відновлення функціонування у штатному режимі, скорочення надання послуг (у відсотках) відносно аналогічного періоду календарного року чи попереднього календарного місяця.

Наказом № 23 Адміністрації державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України від 15.01.2021 [26] затверджено Методичні рекомендації щодо категоризації об'єктів критичної інфраструктури. Сукупний рівень впливу об'єкта, обчислений за наведеною у наказі методикою, визначає категорію його критичності залежно від рівня критичності (РК) за таким принципом:

- I категорія критичності – $0,8 < \text{РК ОКИ} \leq 1$;
- II категорія критичності – $0,63 < \text{РК ОКИ} \leq 0,8$;
- III категорія критичності – $0,37 < \text{РК ОКИ} \leq 0,63$;
- IV категорія критичності – $0,2 < \text{РК ОКИ} \leq 0,37$;
- об'єкт не є критичним – $\text{РК ОКИ} \leq 0,2$.

Під час повномасштабного вторгнення РФ у 2022 році виявилось, що охоплених методикою об'єктів та підходів класифікації недостатньо:

- наявність великої кількості зв'язків між ОКИ передбачає розгляд їх як системи в цілому, наприклад завдання ударів ЗПН противником по системах розподілу енергії в багатьох випадках залишило об'єкти генерації непридатними до використання, хоча їх і не було уражено;
- взаємозалежність ОКИ зумовлює їх динамічні зміни в часі, тобто в разі ураження більш критичного за методикою об'єкта інші, менш критичні, стають набагато важливішими;
- у вказаний перелік методики не увійшли об'єкти культурної спадщини, національні надбання, пам'ятки природи і культури; дата-центри зберігання даних; логістичні хаби та склади, через які, зокрема, передають міжнародну технічну допомогу; військові бази та пункти постійної дислокації окремих військових частин, які опосередковано також пов'язані із критичною інфраструктурою.

З огляду на це було видано Постанову КМУ № 1482, якою визначено спочатку 50, а потім [27] 108 ОКИ, які підлягають першочерговому захисту. Таку кількість визначено експертним методом, не тільки на основі критичності за методикою, але і на основі досвіду та фактичного виконання об'єктами функцій із критичного забезпечення. Зрештою, 20 грудня набрала чинності постанова КМУ від 16.12.2022 № 1384 “Про внесення змін до постанови Кабінету Міністрів України від 9 жовтня 2020 року № 1109 “Деякі питання об'єктів критичної інфраструктури”, у якій Міністерство аграрної політики та продовольства України визначило можливість будь-якого підприємства подати заявку для включення до переліку об'єктів критичної інфраструктури. Очікують, що такий процес триватиме і в інших галузях, зокрема енергетиці.

В майбутньому вважаємо за доцільне переглянути методики детальнішого опису критеріїв та передбачення можливості розгляду пов'язаних об'єктів системи критичної інфраструктури.

1.4. Методики визначення критичності елементів об'єктів критичної інфраструктури

Під час інженерного захисту, кожен ОКІ навіть одного призначення потрібно розглядати окремо, через наявність у них індивідуальних рис, головними з яких є:

- різне географічне розташування, територія, геологічні та кліматичні умови;
- відмінності у потужностях і продуктивності ОКІ, різниця у джерелах та обсягах споживання ресурсів;
- різна номенклатура обладнання, будівель і споруд, індивідуальне компонування, підведення та розташування комунікацій тощо;
- різний технічний стан об'єктів.

Головним чинником є те, що навіть коли кожен ОКІ має переважно індивідуальну або типову сукупність елементів, об'єднаних забезпеченням єдиного головного функціоналу, він складається з устаткування та споруд, елементів всередині КІ, які мають різний ступінь важливості. На жаль, визначена в Україні законодавчо Методика категоризації об'єктів критичної інфраструктури пов'язана тільки з об'єктами в цілому і не розкриває ступеня важливості елементів всередині ОКІ.

Дослідження підходів провідних країн світу [28] до розуміння критичної інфраструктури, а також практична робота на вітчизняних ОКІ енергетичної галузі підтвердили потребу її сприйняття як комплексної системи – мережі, яка включає окремі елементи і ланцюжки з'єднань. Місця з'єднань елементів ланцюжків утворюють вузол. Пошкодження чи руйнування одного з вузлів впливає на діяльність інших та може призвести до повалення всієї критичної інфраструктури, тому в інтересах захисту ОКІ потрібно захищати такі вузли [28].

Головним показником для оцінювання стійкості ОКІ та фінансових втрат у разі його пошкоджень є час, необхідний для відновлення нормального функціонування ОКІ після його ураження, тобто чим менше часу потрібно на відновлення ОКІ, тим більшою є його стійкість до впливу загрози [29]. З огляду на зазначене авторами запропоновано [2] визначати категорії важливості елементів ОКІ таким чином.

Категорія А – конструкції та елементи ОКІ, відмова яких може призвести до повної непридатності до експлуатації ОКІ в цілому або значної його частини, а для їх відновлення потрібно понад 3 тижні. Прикладами таких елементів на об'єктах енергетичної сфери є головні трансформатори, центри управління, турбіни, генератори тощо. Для деяких елементів ОКІ, наслідки ураження яких можуть бути досить значними (атомні реактори, заслінки ГЕС тощо), пропонуємо також виокремити

категорію А+ із забезпеченням розрахунків і відповідного захисту від прямих влучань як відомих, так і перспективних ЗПН противника.

Категорія Б – конструкції та елементи ОКІ, відмова яких може призвести до ускладнення нормальної експлуатації ОКІ або відмови інших елементів ОКІ, які не належать до категорії А, для відновлення яких потрібно 1–3 тижні. Прикладами таких елементів є, зокрема газорозподільчі вузли.

Категорія В – конструкції та елементи, відмови яких не призводять до порушення основної функції ОКІ та функціонування інших конструкцій або їх елементів, а для відновлення потрібно до 1 тижня. Це, наприклад, другорядні газопроводи, лінії електроживлення тощо.

Цей підхід узгоджується із чинним нормативом ДБН В.1.2-14 [30]. Під час улаштування захисту кожного елемента ОКІ енергетичної галузі України, крім військових загроз, мають бути враховані його габарити, технологічні параметри для функціонування та обслуговування, ремонтпридатність і збережуваність. Пропонований підхід є дієвим, тому що **прямо пов’язує конструктивні розрахунки** елементів будівель та споруд ОКІ із коефіцієнтами безпеки за призначенням згідно ДБН В.1.2-14 [30].

Іншим ефективним підходом, прийнятим у багатьох західних країнах для оцінювання критичності елементів всередині ОКІ, є так звана матриця “**CARVER**” [31]. Цю методику аналізу уразливості критичної інфраструктури використовують для оцінювання потенційних цілей атак. CARVER є скороченням від англійської фрази “Criticality, Accessibility, Recuperability, Vulnerability, Effect, and Recognizability” (критичність, доступність, відновлюваність, уразливість, ефект та впізнаваність), матрицю розробили військові США:

C – Criticality/критичність – ідентифікація критичних елементів, окремих точок уразливості;

A – Accessibility/доступність – визначення легкості доступу до критичних систем, операцій та активів;

R – Recuperability/відновлюваність – час потрібний для відновлення після нападу;

V – Vulnerability/уразливість – ефективність системи безпеки проти спроможностей противника;

E – Effect/ефект – масштаб та розмір наслідків;

R – Recognizability/впізнаваність – потенціал противника розпізнати і визначити актив як критичну або значущу ціль.

Методика CARVER базується на поділі ОКІ на окремі компоненти й оцінюванні кожного компонента за шістьма критеріями. Для кожного компонента визначають рівень важливості, легкість доступу, можливість відновлення, уразливість до атак, потенційний ефект атаки та рівень впізнаваності. Це логічний спосіб поглянути на шкоду, якої може намагатися завдати противник, і ступінь такої можливості з огляду на наявні ресурси.

Важливо, що методика CARVER розроблена саме військовими для визначення цілей або їх захисту, а отже дає змогу врахувати особливості воєнних загроз. Початкове призначення CARVER для критичної інфраструктури – допомогти ідентифікувати найбільш уразливі компоненти та визначити найімовірніші сценарії терористичних атак. Ця методика може бути використана для розроблення планів посилення безпеки ОКІ, заходів запобігання тероризму та забезпечення національної безпеки [32].

Щоб оцінити критичні елементи за методикою CARVER, спочатку складають логіко-структурну схему ОКІ, у якій враховують всі елементи, які беруть безпосередню участь або забезпечують основну функцію призначення. Така логіко-структурна схема ОКІ має вигляд напрямленого графа, де вузли позначають елементи конкретного ОКІ, а з'єднання між ними у вигляді стрілочок – залежності або взаємозалежності.

По суті логіко-структурна схема функціоналу ОКІ не обмежується самим об'єктом, виходячи за його межі в сенсі зв'язків обігу енергій, постачання ресурсів тощо, тому що сам ОКІ є вузловим елементом-перетворювачем у єдиній енергосистемі інфраструктури.

Для проєктування системи інженерного захисту необхідно насамперед зібрати інформацію для аналізу кожного окремого ОКІ. Така вихідна інформація має, зокрема, включати:

- в паперовому та електронному вигляді плани і розрізи ОКІ із прив'язкою до окремих будівель з рельєфом (у масштабі 1:500...1:2000);
- дані інженерних вишукувань;
- відомості про проведені ремонти та реконструкції, фактичне використання обладнання;
- ступінь автоматизації ОКІ;
- технологічні схеми основного обладнання;
- електричні схеми;
- схеми підключення до електромережі – суміжні лінії та підстанції;
- робочі проєкти конструктивів основних споруд;
- концепцію цивільного захисту на ОКІ;
- перелік джерел ресурсів та постачальників;
- проєктні і фактичні потужності;
- обсяги і джерела викидів, джерела тепловипромінювання;
- схеми і засоби вогнезахисту та пожежогашіння, їх характеристики;
- концепцію охорони, моніторингу та управління ОКІ;
- навколишні автомобільні та залізничні шляхи;
- всі потенційно небезпечні об'єкти.

Джерелами інформації мають бути насамперед експлуатуючі організації-оператори, але також дані можуть надавати профільні міністерства, відомства, проєктні організації тощо.

Приклад. На рис. 1.15 показано приклад логіко-структурної схеми функціоналу для об'єкта-представника ОКІ, типової ТЕС. Вибраний для

прикладу об'єкт є мультипаливною ТЕС (рис. 1.16) із такими **основними ознаками**:

- широка територія (пн-пд – близько 1,3 км; сх-зх – близько 5,5 км);
- наявність з південного боку протяжних пагорбів;
- наявність з північного боку рівнинної місцевості, міської забудови та об'єктів цивільної інфраструктури;
- наявність зі східного боку водного басейну річки, що простягається з півночі на схід;
- наявність на території ОКІ двох важливих об'єктів великого розміру та кількох інших важливих об'єктів;
- наявність демаскуючих ознак у видимому оптичному діапазоні у вигляді споруд великого розміру;
- наявність демаскуючих ознак у тепловому оптичному діапазоні у вигляді технологічних споруд високої теплової контрастності;
- наявність демаскуючих ознак у радіолокаційному діапазоні у вигляді великої кількості металевих і залізобетонних конструкцій різного розміру.

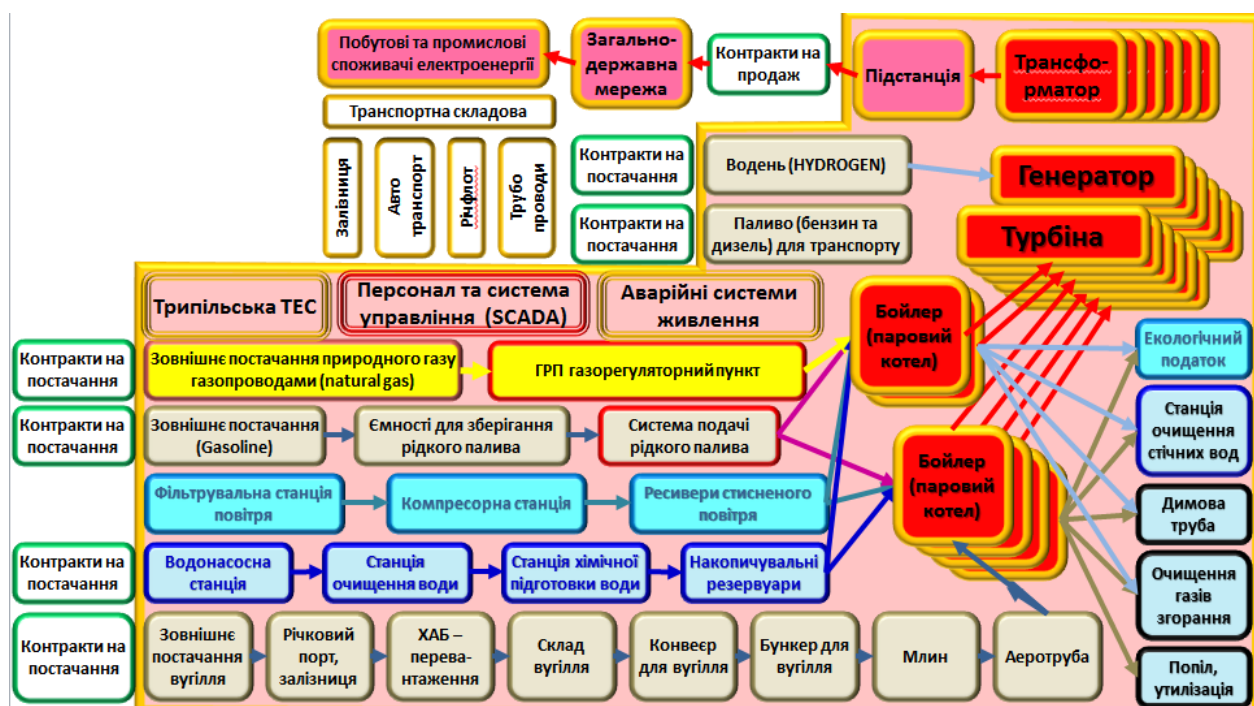


Рис.1.15. Приклад логіко-структурної схеми CARVER для визначення елементів ОКІ, які слід взяти до уваги для аналізу об'єкта-представника ТЕС

Вид палива: вугілля (основне паливо), газ, мазут. Теплоелектростанція містить 3 енергоблоки по 300 мВт на вугіллі, 1 енергоблок на 325 мВт на вугіллі, 2 енергоблоки по 300 мВт на мазуті, трансформатори типу ТДЦ-400000/330, 6 турбін та генераторів загальною номінальною потужністю 1800 мВт. На об'єкті є відкритий склад вугілля на 280 тис. т.

Опис технології: виробництво енергії відбувається у головному корпусі, де встановлено основне обладнання (котли, турбогенератори) і

допоміжне (вугільні млини, вентилятори дуття, насоси, підігрівачі тощо, що відповідає типовій схемі ТЕС (див. п 1.2).



Рис.1.16. Зовнішній вигляд і турбінна зала об'єкта-представника ТЕС

Визначення зв'язків між елементами за логіко-структурною схемою дає змогу встановити їх важливість кількома методами, основним серед них є метод критичного шляху, відповідно до якого елемент, що бере участь в основному функціональному процесі (до нього / від нього ведуть багато стрілок або він безальтернативно стоїть на шляху основного процесу), має більшу критичність.

Надалі оцінювання за методикою CARVER проводять за бальною схемою за шістьма показниками об'єкта. У табл. Д 1.1 наведено параметри CARVER, які визначають бали, адаптовано до ОКІ.

Бали для не кількісних показників визначають на основі досвіду захисту аналогічних об'єктів експертним шляхом. За результатами отриманої бальної оцінки визначають два ключових показники:

$$C+R+E = \text{Важливість (Importance, IMPACT)}$$

та

$$A+V+R = \text{Ймовірність ураження (Attack Success Chance, LIKELIHOOD)}$$

Кінцева **пріоритетність елемента** ОКІ може бути визначена як сума:

$$\text{Priority Rating} = \text{важливість} + \text{ймовірність ураження}.$$

Як приклад зведеної оцінки, можна навести показану вище ТЕС. Елементи станції, визначені на основі складання логіко-структурної схеми її основної функції, були експертно оцінені за критеріями табл. 1.1, результати оцінювання наведено у табл. Д 1.2.

Елементи ОКІ, які отримують за методикою **CARVER** найвищі показники **Priority Rating**, мають бути захищені в першу чергу, тому що потенційно є вірогідно пріоритетними цілями для противника, а також істотно впливають на функціонал об'єкта навіть у разі їх випадкового ураження.

РОЗДІЛ 2. ЗАСОБИ ПОВІТРЯНОГО НАПАДУ ПРОТИВНИКА НА ЕНЕРГЕТИЧНУ ГАЛУЗЬ УКРАЇНИ

2.1. Типологія і характеристика загроз від засобів повітряного нападу Російської Федерації

Основними засобами ураження ОКІ України є крилаті та аеробалістичні ракети повітряного, наземного та морського базування, а також авіаційні ракети і БпЛА оперативного рівня.

Також поблизу лінії зіткнення із противником та біля державного кордону РФ застосовує для ударів по ОКІ плануючі бомби, комплекси С-300 та С-400. Артилерія, БпЛА тактичного рівня та авіаудари із застосуванням тактичних ракет по ОКІ зазвичай не застосовуються через малу ефективну дальність їх застосування. Очевидно, що розміщення ОКІ поблизу державного кордону або лінії зіткнення із противником не є доцільним, а уникнення терористичних атак та диверсійних дій із застосуванням стрілецької та іншої зброї – є питанням відповідних органів безпеки. Систематизацію воєнних загроз для ОКІ від ЗПН РФ наведено у табл. Д 2.1.

Засоби **ракетного озброєння**, які використовує РФ для ударів по ОКІ у війні проти України, налічують кілька десятків типів. Ми розглянемо найбільш небезпечні та далекобійні засоби, відомі станом на час написання книги у 2023 році. Визначено, що основними напрямками ракетних ударів, завданими країною-агресором по території України із застосуванням крилатих ракет різного типу, є: з території Білорусі (пуски крилатих ракет “Іскандер”); з акваторії Чорного моря і території тимчасово окупованої Автономної Республіки Крим (пуски з берегових комплексів “Бастіон-П” крилатих ракет “Онікс”; із кораблів Чорноморського флоту – крилатих ракет “Калібр”; крилатих ракет класу “повітря-поверхня” Х-101, Х-555 із застосуванням стратегічних бомбардувальників Ту-160, Ту-95МС, Ту-22М3М, а також одиничні випадки застосування крилатих ракет “Іскандер” і ракет “Точка-У”); з акваторії Каспійського моря (кораблі Каспійського флоту – крилатих ракет “Калібр”, крилатих ракет класу “повітря–поверхня” Х-101, Х-555 із застосуванням зазначених стратегічних бомбардувальників); з території РФ (крилатих ракет “Іскандер”, ракет типу “Точка-У” для ударів на відстань до 120 км, крилатих ракет класу “повітря–поверхня” Х-101, Х-555 із застосуванням зазначених стратегічних бомбардувальників) [1].

Відомими літаками-носіями, з яких здійснюють пуски крилатих ракет класу “повітря-поверхня” РФ, є Су-24, Су-27, Су-30, Су-34, Су-35С, Су-57, МіГ-29, МіГ-31, МіГ-35, Ту-22М3, Ту-95МС, Ту-160. При цьому, також визначено, що як носії ракет класу “повітря-поверхня”, під час повномасштабного вторгнення, країна-агресор застосовувала переважно літаки МіГ-31, Ту-22М3М, Ту-95МС, Ту-160 [2]. Загальний вигляд цих ракет та їх носіїв наведено на рис. 2.1.

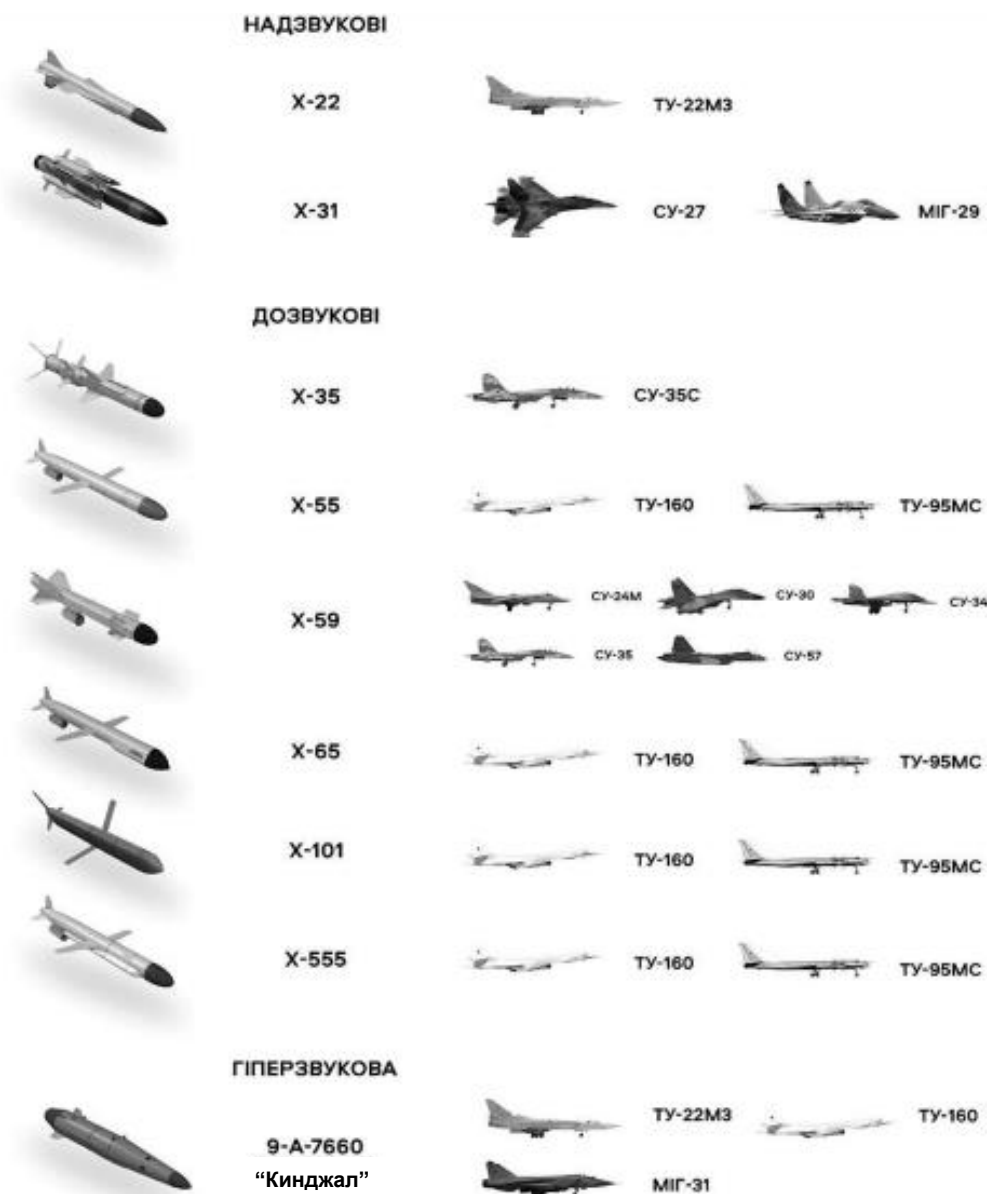


Рис. 2.1. Загальний вигляд ракет повітряного базування та їх носіїв, якими атакують ОКІ

Однією з головних проблем в ідентифікації загроз для ОКІ від ЗПН противника є малий обсяг доступних даних про їх тактико-технічні характеристики. Основні характеристики бойових ракет РФ можна знайти у відкритих джерелах [3], але їх специфічні параметри допоки невідомі. В таких випадках виправданим є моделювання параметрів ракет і застосування змодельованих характеристик або використання аналогів.

Відомі дані про ракети РФ, якими атакують ОКІ в Україні, зведено в табл. 2.1. Важливою інформацією про ракетні ЗПН також є відомості щодо їх системи управління та наведення. Наявна інформація про системи управління та головки самонаведення крилатих ракет повітряного базування (КПРБ) РФ наведено у табл. 2.2 [1].

У таблиці 2.2. прийнято наступні скорочення: АРГСН – активна радіолокаційна головка самонаведення; ІНС – інерційна система; ПРЛГСН – протилокаційна головка самонаведення; ДРЛОиУ – система дальнього

радіолокаційного виявлення та управління; СНС – супутникова навігаційна система; РВ – радіовисотомір; ОЕГСН – оптико-електронна головка самонаведення; ГІСУ – геоінформаційна система управління.

Таблиця 2.1

Основні характеристики ракет якими РФ атакуються ОКІ

Тип ракети	Довжина, м	Діаметр, м	Вага БЧ, кг	Максимальна швидкість, м/с	Стартова маса, кг
9К79Г “Точка-У”	6,4	0,65	482	1100	2010
Х-59	5,7	0,4	310	291,67	900
Х-22	11,7	0,94	960	1111,11	5780
9М723 “Іскандер”	7,3	0,92	480	2450,00	3800
Х-55/Х-555	6,04	0,77	450	260,00	1500
3М-14К/Т “Калібр”	8,2	0,514	450	240	1320
Х-47 “Кинджал”	7,7	0,9	500	4080	4615
Х-101	7,5	0,74	430	200,00	2400
П-800 “Онїкс”	8,9	0,67	300	884	3900
Х-35	4,4	0,42	145	280	670

Таблиця 2.2

Наявні дані про системи управління та головки самонаведення основних КІРБ РФ

Назва ТТХ	Типи КІРБ							
	Х-22	Х-31	Х-35	Х-55	Х-59	Х-101	Х-555	“Кинджал” 9-А-7660
Система управ- ління	ІНС+ АРГС Н (ПРЛ ГСН)	ІНС+ ПРГСН	ІНС+ СНС+ РВ+ АРГС Н	ІНС+ СНС+ РВ+ АРГС Н	ІНС+ СНС+ РВ+ АРГС Н	ІНС+ СНС+ РВ+ Спрут (ймовірн о)+ ОЕГСН	АРГС Н, ГІСУ	ІНС з можливістю корегування по системам ГЛОНАСС, ДРЛОиУ, оптична ГСН
Голівка самона- ведення	Радіо локац ійна	Широко смугова ПРГСН Л-130	АРГС Н “Гран ь-К”	АРГС Н	АРГС Н АРГС- 59Э	Оптична ГСН, радіолок аційна ГСН	АРГС Н	Оптична ГСН, радіолокацій на ГСН

Бойове застосування ракет противником залежить передусім від параметрів їх бойової частини (БЧ). Точні тип і маса вибухової речовини (ВР) у БЧ відомі на час написання цієї праці для ракет “Точка-У” (162,5 кг, 20% тротилу і 80% гексогену, гексоліт ТГ20) і Х-22 (630 кг, тип ВР ТГАГ-5) [4]. На підставі цих даних, а також компонувальних обмежень [5], для інших ракет прогнозовано, що маса ВР становить орієнтовно 65% від маси БЧ. Кут зустрічі з об’єктом ураження відомий тільки для комплексів “Точка-У” та “Іскандер”, і становить приблизно 90° [6]. Для інших ракет із довідкової літератури може бути прийнято кут ураження до 80° включно.

З аналізу відкритих джерел [7] встановлено, що тип ураження оперативно-тактичної ракети 9К79 комплексу “Точка-У” (підрив осколково-фугасної БЧ типу 9Н123Ф зосередженої дії для більшої ефективності проводять на висоті 10..20 м відрізняється від інших ракет, які ми розглядаємо. Ракета комплексу “Іскандер” має такі типи БЧ: осколково-фугасна, фугасно-запальна та проникна. Надзвукова крилата протикорабельна ракета повітряного базування Х-22 має фугасно-кумулятивну дію з БЧ 9А-22. Стратегічні авіаційні крилаті ракети Х-55/Х-555 мають фугасні варіанти БЧ. Ракети “Калібр” у штатній комплектації 3М-14К/3М-14Т (3М-14КЭ/3М-14ТЭ) оснащені БЧ фугасної дії.

Гіперзвукова авіаційна ракета 9-С-7760 комплексу Х-47М2 “Кинджал” також оснащена БЧ фугасної дії. 4 травня 2023 року ЗС України вперше вдалося збити російську гіперзвукову ракету комплексу “Кинджал” використовуючи комплекс “Patriot”. Дослідження БЧ дало змогу встановити, що її виконано за типом фугасної авіабомби БЕТАБ-500ШП, яка має пробиваність залізобетонних перекриттів біля 1 м (рис. 2.2). На основі цих даних можна припустити, що характеристики ракет комплексу “Кинджал”, заявлені РФ, значно завищені.



Рис. 2.2. Вигляд БЧ збитої 04 травня 2023 року над Києвом ракети “Кинджал” з оболонкою із титанового сплаву 20...24 мм завтовшки [8]

У стратегічній крилатій ракеті типу “повітря-поверхня” Х-101 може бути використовувана осколково-фугасна, проникна та об’ємно-детонуюча БЧ. Надзвукова універсальна протикорабельна ракета середнього радіуса дії П-800 “Онікс” може бути оснащена фугасною і проникною БЧ [4], у ракети Х-35У БЧ – проникний фугас. Надалі ракети “Точка-У” не розглядатимемо, оскільки у них не має варіантів БЧ фугасної або проникної дії. Інші ракети натомість мають бути розглянуті як потенційно небезпечні для ОКІ в разі прямих влучань. Для розрахунків прийнято фугасний проникний тип БЧ як найбільш руйнівний для захисних споруд елементів ОКІ.

Під час влучання більшість ракет мають уже відпрацьований на кінцевій ділянці аеробалістичної (балістичної) траєкторії маршовий двигун, відповідно вага ракети зменшена на вагу використаного пального. Для

сучасних ракет стандартної комплектації передбачений запас палива 50–80% ваги ракети [9]. Отже, для розрахунків удару ракети у споруду, її маса у момент влучання може бути прогнозовано прийнята близько 35% стартової ваги. При розрахунку проникнення у конструкцію БЧ повинна прийматися тільки вага власне БЧ. 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 [10] (при таких швидкостях не утворюється плазмова хмара на голівці, як при гіперзвуковому русі).

Для гіперзвукових ракет падіння швидкості під час виконання маневру “тірка” в кінці польоту становить до 5,5 разів, що може бути прийнято для гіперзвукової авіаційної ракети Х-47М2 “Кинджал” (рис. 2.3). Довжина БЧ, яка необхідна для подальших розрахунків фугасної дії, відома точно для ракет 9М723 (9М729) комплексу “Іскандер” (рис. 2.4).

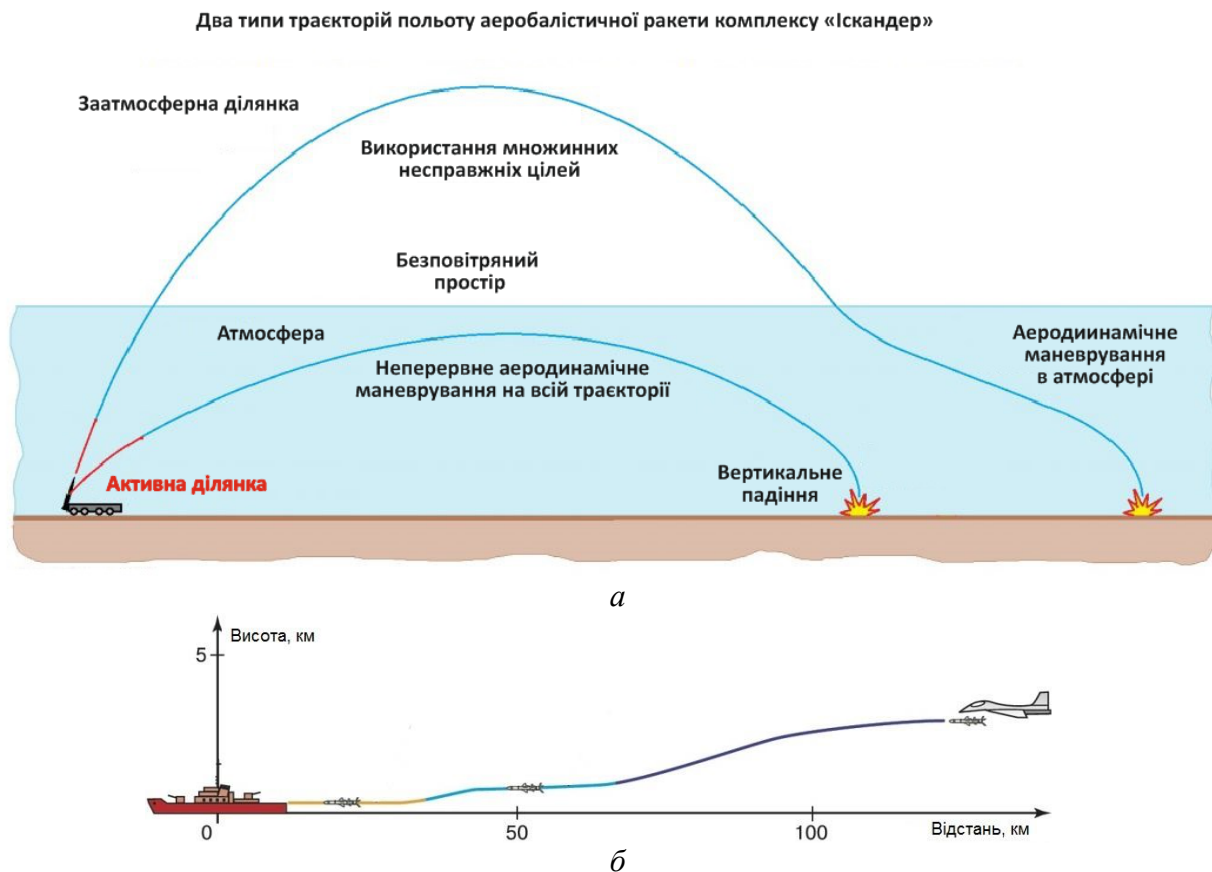


Рис. 2.3. Траєкторія ракет: а - аеробалістична типу “земля-земля” 9М723 (9М729) комплексу “Іскандер”, (а) [7]; б - “повітря-земля”

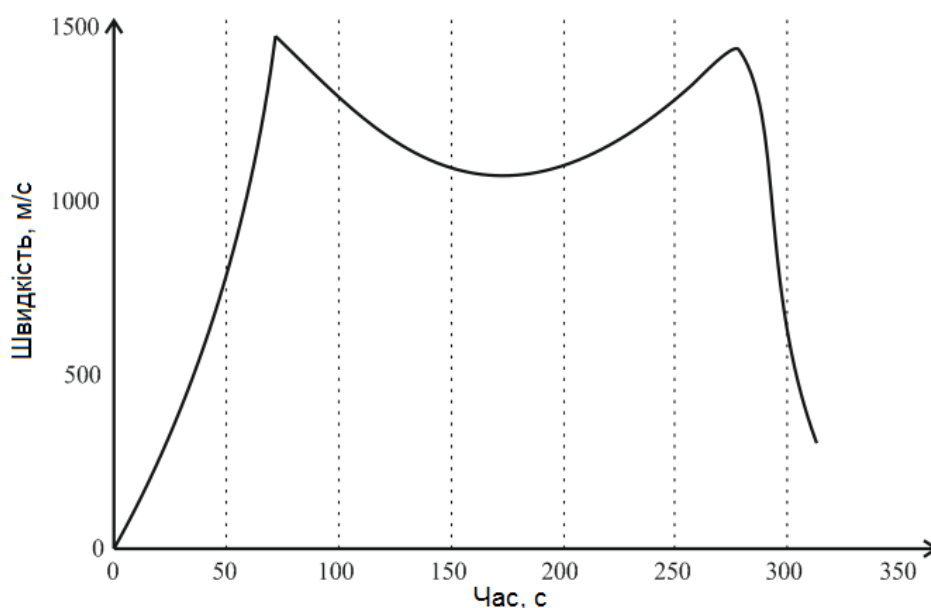


Рис. 2.4. Стандартний графік швидкості гіперзвукових балістичних ракет [9]

Для ракети Х-22 довжина БЧ становить приблизно третину від загальної. Для ракети Х-47М2 “Кинджал” сукупна довжина БЧ складає близько 2,8 м, для ракети Х-55 – близько чверті від загальної довжини (рис. 2.5). Відповідно для інших ракет співвідношення може бути прийняте схожим. Отже, для подальших розрахунків приймемо додаткові характеристики ракет РФ, використовуваних для ударів по ОКІ в Україні (табл. 2.3 та [12]). Дані щодо ЗПН можуть надалі природно змінюватися після виявлення нової інформації та дослідження трофейних зразків.

Таблиця 2.3

**Додаткові відомості та ймовірні характеристики ракет РФ,
використовуваних для ударів по ОКІ в Україні**

Тип ракети	Вага БР, кг	Кут зустрічі, град.	Маса в момент влучання, кг	Швидкість у 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*	600*	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 наведена на основі дослідження аналогів.

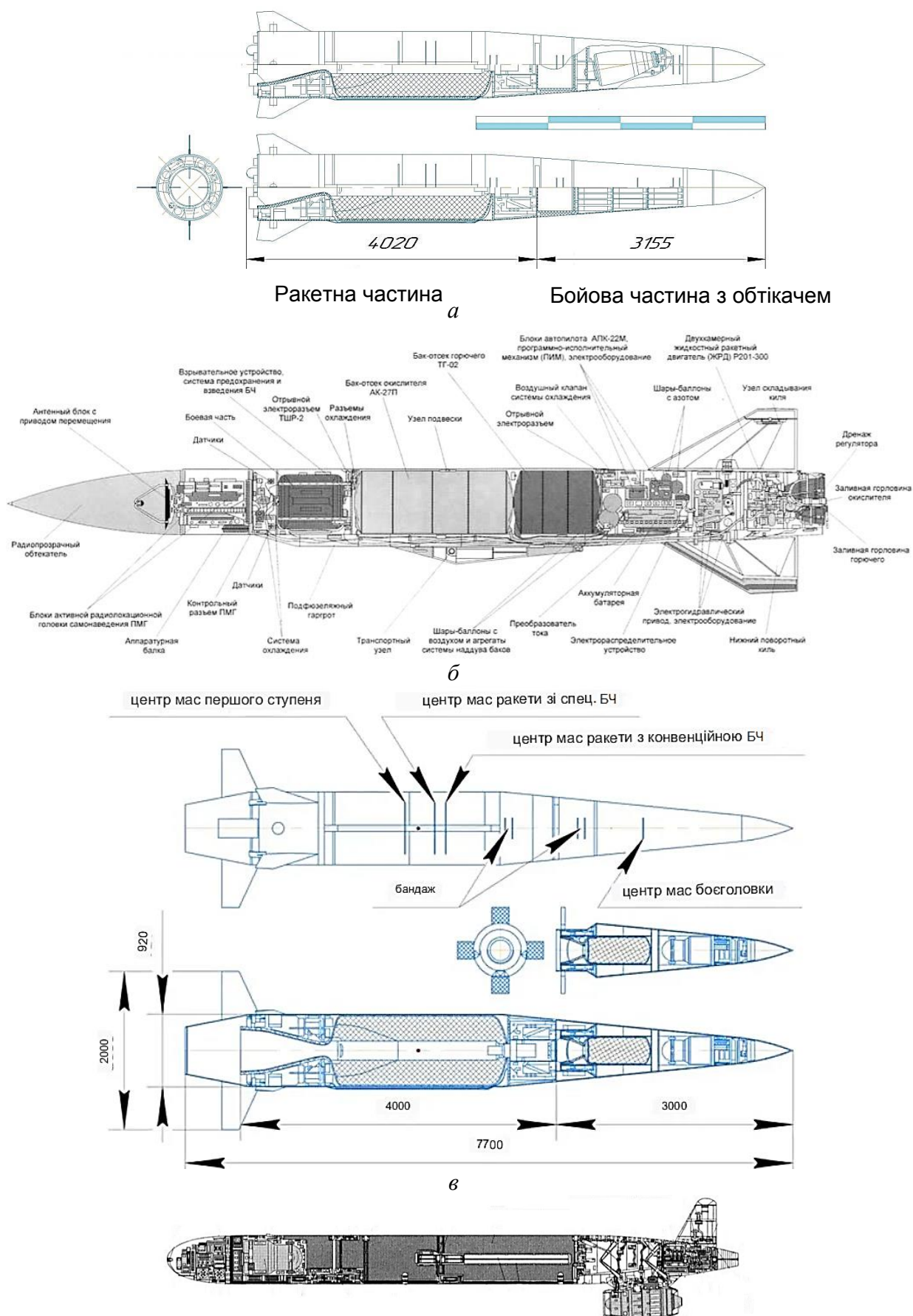


Рис. 2.5. Компонувальні схеми ракет: *a* – 9М723 (9М729) комплексу “Іскандер”; *б* – Х-22 “Буря”; *в* – Х-47М2 “Кинджал”; *г* – Х-55

Окрім ракет, РФ завдає ударів по ОКІ України із використанням БпЛА типів “камікадзе” або “баражуючий боєприпас”. Якщо переважну кількість типів ракет противника можна завчасно відстежити і уразити українськими системами ППО, БпЛА типу “баражуючий боєприпас”, які використовує РФ, запускають із мобільних установок, переважно вночі, це засоби вибіркового ураження, що за статистикою часто демонструють точність вищу, ніж у ракет. Низька висота польоту (50..200 м), практична відсутність металевих деталей у корпусі роблять БпЛА малопомітними для РЛС, а комбінований тип наведення, до кінця не вивчений, зумовлює стійкість таких ЗПН до дії засобів РЕБ. Також масовий запуск противником БпЛА кількома групами одночасно або по черзі з коротким інтервалом, комбінування з ракетами та фальш-цілями – спричиняють можливість їх високої прохідності до цілі. В реаліях 2022-2023 років найчастіше застосовувала проти об’єктів критичної інфраструктури України БпЛА “Shahed-131” та “Shahed-136”. Це БпЛА іранського виробництва, закуплені РФ через брак власних літальних апаратів. Також із відкритих джерел відомо про можливу побудову заводів зі збирання зазначених БпЛА на території РФ та її сателітів. Маркування, нанесене на БпЛА “Shahed-131” та “Shahed-136” противником замість оригінального – відповідно “Герань-1” та “Герань-2”.

Основні характеристики БпЛА “Shahed-131” та “Shahed-136” наведені у табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Основні характеристики БпЛА які РФ використовує для ударів по ОКІ в енергетиці України

Тип БпЛА	Довжина, м	Ширина, м	Вага БЧ, кг	Тип БЧ	Максимальна швидкість, м/с	Стартова маса, кг
“Shahed-131”	2,6	2,2	15...20	Мультикумулятивний, осколково-фугасний	27,8...30	135
“Shahed-136”	3,5	2,5	50...60	Проникно-фугасний, осколково-фугасний	45...50	200

Як видно із табл. 2.4, БпЛА “Shahed-131” значно поступається за ТТХ пізнішій модифікації “Shahed-136”, тож надалі увагу зосередимо саме на розгляді останнього. Висота польоту “Shahed-136” на маршовій ділянці може варіюватися від 700 м до 2000 м, на підльоті до цілі – до 1500 м. На кінцевому етапі польоту ударні БпЛА після виходу в район визначеної цілі певний час можуть баражувати у цьому районі, після чого знижуються до 150...300 м, а перед атакою цілі виконують типовий для більшості баражуючих боєприпасів маневр “гірка”, очевидно, для підвищення кінетичної сили удару та ураження верхньої частини цілі, яка, як правило, менш захищена (рис. 2.6, 2.7). Запуск БпЛА противником вночі, можливе чорне забарвлення поверхні планера, виявлене наприкінці 2023 року –

ускладнюють їх візуальне виявлення постами спостережень та мобільними вогневими групами.



Рис. 2.6. Вигляд іранського експерименту з атаки БпЛА “Shahed-136” [12]

Безпілотні літальні апарати “Shahed-136” мають незначну швидкість польоту на маршовій ділянці (максимальна швидкість – до 185 км/год., середня спостережувана 140...150 км/год.) [14]. Під час горизонтального руху швидкість апарата може сягати 45 м/с на висоті 200 м. Під час пікірування швидкість апарата може сягати 50...60 м/с. Кут атаки цілі становить 20...60°.

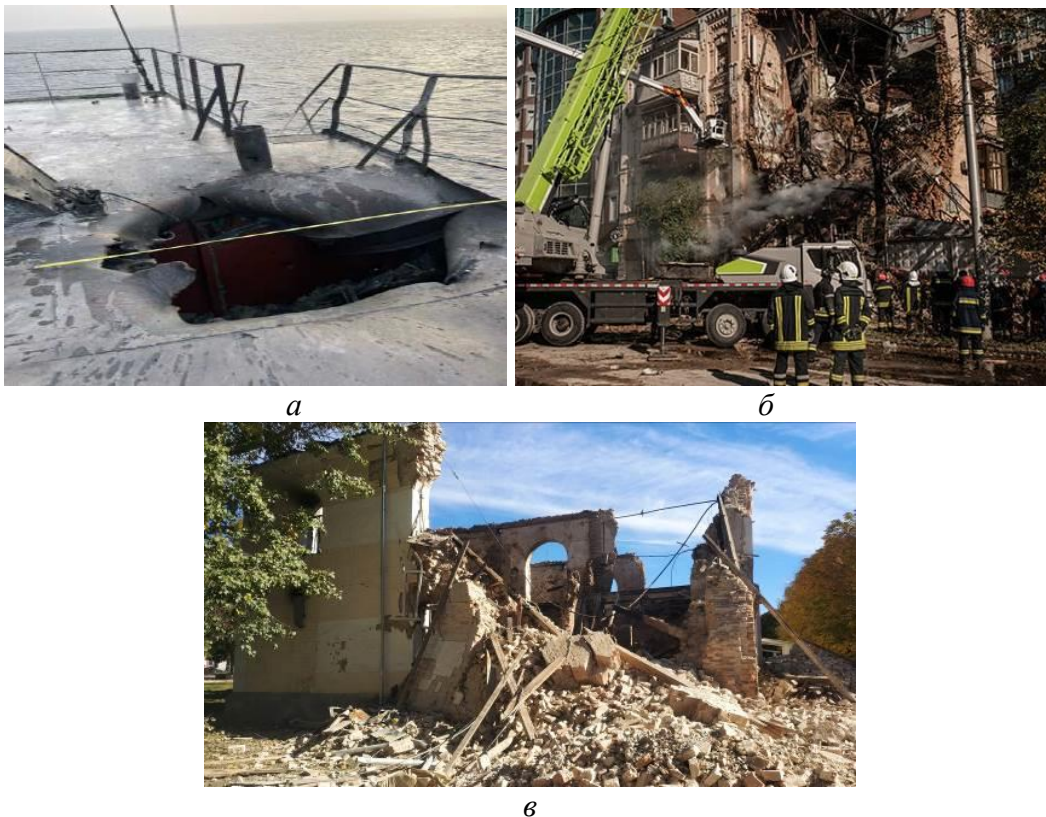


Рис. 2.7. Наслідки влучання “Shahed-136”: *а* – у човен з металевим корпусом [13]; *б* – у житловий будинок в Києві; *в* – у будівлю в м. Біла Церква

Експерти звернули увагу на низьку кінетику баражуючих боєприпасів “Shahed-136”, що пов’язано із відносно невеликими швидкостями навіть на кінцевій траєкторії наведення на ціль. Планера БпЛА “Shahed-136” скомпоновані як класичне дельтоподібне крило (рис. 2.8).

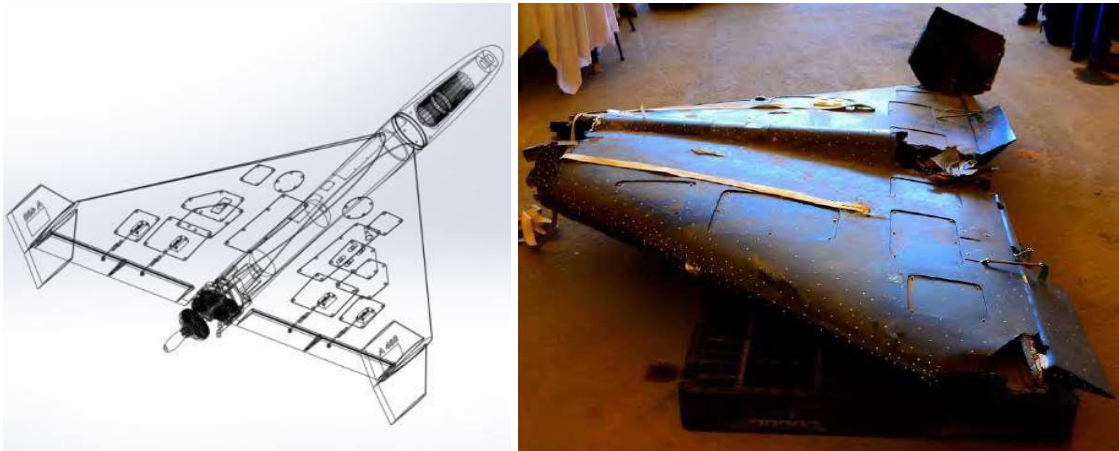


Рис. 2.8. Загальний вигляд і структурна будова “Shahed-136” та пошкоджений корпус цього типу БпЛА

Аналіз решток БпЛА “Shahed-136” дає змогу зробити висновок, що апарат має несучий корпус без внутрішнього каркасу, з’єднання – клейові, а також за допомогою металевих кутикових елементів, прикріплених болтами, що також частково є додатковими елементами жорсткості. Встановлено, що корпус виготовлений зі стільникового арамід [15]. Панелі з арамід утворюють несучий елемент обклеюванням із двох сторін обшивкою зі склотканини завтовшки 0,13 мм [16]. Зовні на тканині нанесене акрилове покриття для захисту від вологи, надання кольору і для аеродинамічної обтічності, сукупна товщина тканини із акриловим покриттям становить 0,4 мм. Основні несучі частини корпусу (фюзеляж, крила) виготовлені із товщиною несучої обшивки 11,4 мм. Другорядні і невеликі за розмірами частини корпусу (стабілізатори, елерони) виготовлені із товщиною несучої обшивки 6,6 мм (рис. 2.9). В 2023 році також виявлені нові модифікації БпЛА “Shahed-136”, в яких використовуються панелі із багатошарового карбону.



Рис. 2.9. Товщина несучої обшивки та кутикові металеві елементи кріплень панелей БпЛА “Shahed-136”

Безпілотні літальні апарати “Shahed-131” за результатами досліджень [17] мають БЧ із комбінованою осколково-мультикумулятивною дією. Бойова частина БпЛА “Shahed-131” конструктивно є подовженим зарядом діаметром 140 мм та довжиною 485 мм без урахування висоти підривного пристрою з сегментами готових елементів ураження та вмонтованими ударними ядрами овальної форми, розташованими в шаховому порядку і рівномірно розподіленими по довжині корпусу основного заряду на однаковій відстані. Бойова частина виконана з фрезованої сталевих труби, заздалегідь покритої шаром нікелю гальванічним методом. З нижнього боку розташована кумулятивна лінза, виготовлена з міді завтовшки 3 мм, діаметром 130 мм, висотою 90 мм. Це основна передня кумулятивна частина. У верхній частині заряду на клейовій основі по колу БЧ розташовані готові елементи ураження з металу сріблястого кольору кубічної форми двох типорозмірів: розміром $10 \times 10 \times 10$ мм вагою 7.5 г. кожен загальною кількістю 88 шт.; розміром $8 \times 8 \times 8$ мм 1080 шт. вагою по 4 г. розташовані за першим колом елементів ураження верхньої та нижньої частин в 10 рядів, загальна кількість – 22 ряди. Елементи ураження зовні покриті шаром поліефірної смоли та армовані скло-тканиною сіткою, яка забезпечує міцність зовнішнього шару. Загальна вага елементів ураження – 4980 г. Вага БЧ, включно з матеріалом корпусу заряду, вибуховою речовиною, кумулятивною лінзою, готовими уражувальними елементами, ударними ядрами, елементами кріплення та фіксації становить 19,5 кг. Основний розривний заряд виготовлений методом лиття сплаву ВР у заздалегідь підготовлений корпус із вмонтованими елементами ураження – кумулятивною лінзою, готовими елементами ураження та ударними ядрами. Подовжене ударне ядро овальної форми виготовлено з міді методом гарячого пресування після відливання у форму, має довжину 90 мм, ширину 63 мм, товщину 4 мм, кількість 18 штук по 140 г. кожне.

Матеріал ВР у БЧ однорідний, без наявних пустот та видимих кристалів гексогену, світло-коричневого кольору, густина заливки ВР ТГ-50 г/см^3 (сплав тротилу з гексогеном 50/50) становить – $1,64 \dots 1,68 \text{ г/см}^3$, первинна швидкість детонації – $7650 \dots 7800 \text{ м/с}$. Вага заряду ВР типу ТГ-50 становить 10 кг. Підривник – інерційного типу із годинниковим механізмом відтермінування зведення. Ідентифікацію стану пристрою позначено червоним (бойове положення) та зеленим (транспортне положення) кольором. У нижній частині підривника приєднано алюмінієву трубу з шістьма циліндричними шашками ВР діаметром 25 мм та висотою 19 мм, загальною вагою 90 г. У разі зіткнення з перешкодою інерційний механізм наколює капсюль-спалахувач, що призводить до спрацювання детонатора, проміжного детонатора та передає детонацію основному заряду ВР. Підривник не має механізму переведення в безпечний стан, механізму невилучення, механізмів самоліквідації та самонейтралізації (рис. 2.10).

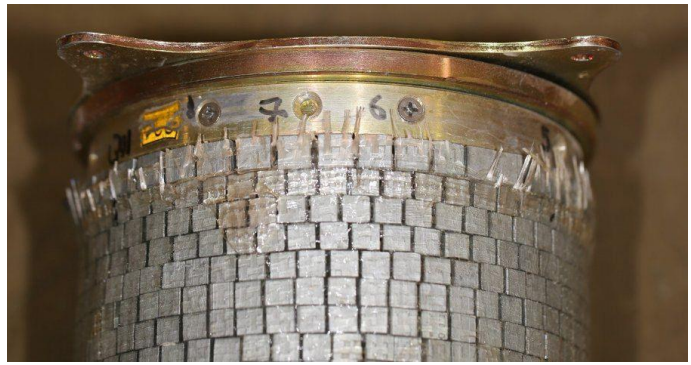
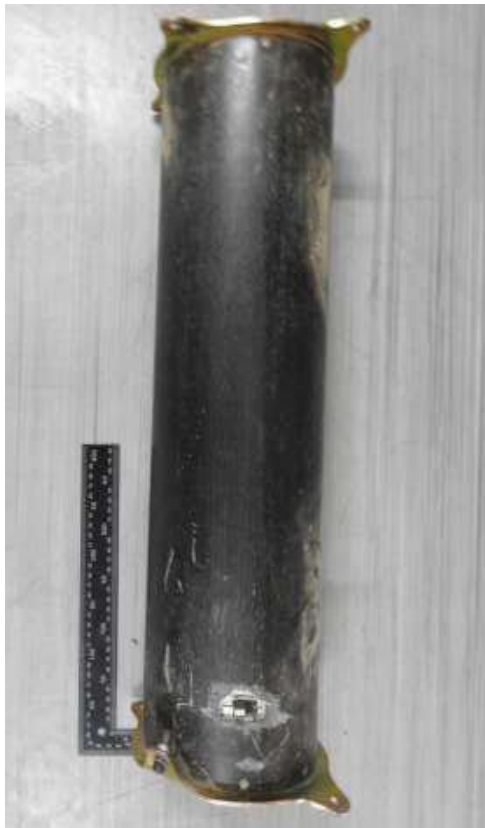


Рис. 2.10. Бойова частина БпЛА “Shahed-131” із комбінованою, осколковою мультікумулятивною дією

На підставі аналізу влучань в об’єкти на території України визначено що БЧ “Shahed-136” має фугасну дію, можливо дещо підсилену запалювальною дією решток пального у баку.



Рис. 2.11. Конічна бойова частина БпЛА “Shahed-136” і передній заряд – ударне ядро

У цій праці ми розглядаємо ураження тільки від БпЛА “Shahed-136”, тому що його БЧ частина значно більша та небезпечніша за аналогічну у БпЛА “Shahed-131”. Експертам у жовтні 2022 року вдалося дослідити БЧ БпЛА “Shahed-136”. Ця БЧ має форму конуса, товщина її посиленого

сталевому корпусу становить 7 мм, і тут задум терористів очевидно був таким: спочатку БЧ пробиває стіни будівлі, а уже потім відбувається підрив [18]. В інших випадках було спостережене те саме [19]. Є відомості, що попереду конічної БЧ “Shahed-136” може бути закріплений також кумулятивний заряд – ударне ядро вагою до 1 кг для форвардного пробиття отвору в оболонці або стіні цільового об’єкта і проникнення основної БЧ (рис. 2.11).

Власне дослідження оболонки БЧ “Shahed-136” показало її геометричні параметри, наведені на рис. 2.12. За даними британських дослідників [12], аналіз уламків “Shahed-136” після вибуху і вибухохімічні тести виявили наявність ВР – гексогену.

Пізніша публікація [20] та власні виміри підтвердили припущення експертів, що загальна вага БЧ становить близько 25% від максимальної злітної ваги БпЛА. Якщо загальна вага БпЛА “Shahed-136” становить близько 60 кг, можна припустити, що вага ВР – 20...30 кг.



Рис. 2.12. Вигляд і типорозміри сталеві оболонки БЧ “Shahed-136”

Підривач, за даними [20], може бути виставлений на миттєве чи уповільнене спрацювання. Отже, навіть у разі механічної зупинки планера БпЛА якоюсь перешкодою важка конічна БЧ теоретично може по інерції проникнути далі, руйнуючи обтікач, що робить її проникно-фугасною. Аналіз місця розриву БЧ “Shahed-136” після збиття показав, що вирва має діаметр близько 5 м та глибину 1,62 м. Найбільший вибіркоковий уламок, знайдений на місці вибуху, має розміри 9×2 см, товщину 0,7 см (рис. 2.13, а).

У 2023 році було виявлено ще один тип БЧ “Shahed-136”, який імовірно є стандартним боезарядом радянського чи російського виробництва із протитанкових чи зенітних ракет або іншого типу озброєння (рис. 2.13, б).



а



б

Рис. 2.13. Наслідки розриву БЧ “Shahed-136”: *а* – воронка та розміри осколку від із місця вибуху; *б* – новий тип БЧ, знайдений у 2023 році

Розглянемо можливу загрозу від ракет ЗРК та бомб. У ближній зоні до державного кордону із РФ та РБ і до лінії зіткнення небезпеку становлять ЗПН противника досить невеликого радіуса дії. Це насамперед комплекси С-300, С-400/“Торнадо-С” та плануючі бомби (рис. 2.14). Їх основні характеристики наведено у табл. 2.5. Дані про такі ЗПН взяті із відкритих джерел.

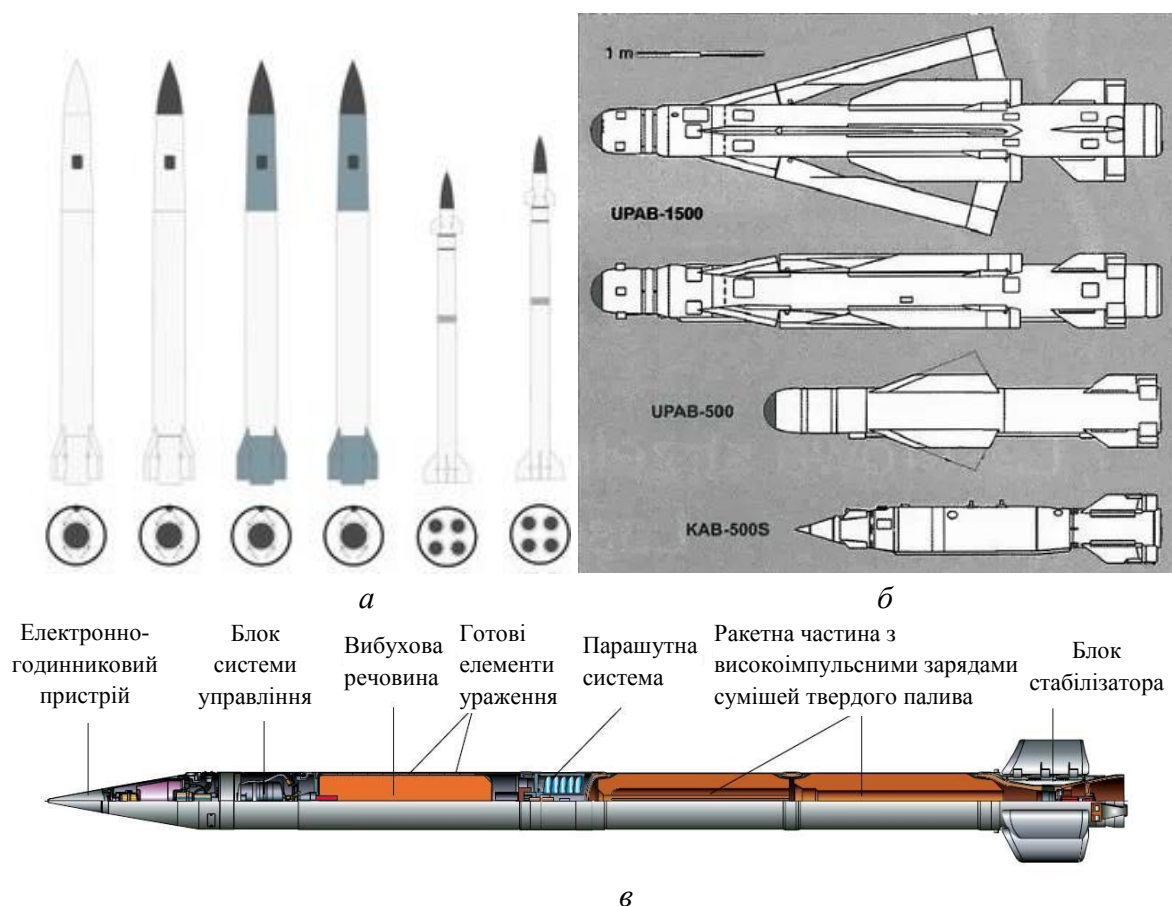


Рис. 2.14. Засоби повітряного нападу невеликого радіусу: *а* – типи ракет комплексу С-300; *б* – плануючі бомби; *в* – реактивний снаряд 9М528 “Торнадо-С”

Таблиця 2.5
Основні дані про ЗПН РФ ближнього радіуса дії

Тип ЗПН	Довжина, м	Діаметр, м	Вага БЧ, кг	Максимальна швидкість, м/с	Стартова маса, кг
5В55Р / 5В55К (С-300)	7,25	0,508	133	2100	1850
КРС* 9М528 (осколково- фугасний “Торнадо-С”)/С-400 “Тріумф”	7,6	0,3	243	900	560
КАБ-500/ КАБ-500Т	3,05	0,4	534	277,78	534
КАБ-1500Л	4,545	0,58	1500	222,22	1500
УПАБ-1500Б-Э	5,05	0,4	1525	277,78	1525

*КРС – керований реактивний снаряд

Додаткові дані про ЗПН, необхідні для розрахунків інженерного захисту, наведені у табл. 2.6.

Для авіабомб довжина БЧ може бути прийнята рівною довжині бомби, а швидкість у момент влучання – максимальній.

Таблиця 2.6

**Додаткові відомості та ймовірні характеристики ракет які РФ
використовує для ударів по ОКИ в Україні**

Тип ЗПН	Вага ВР, кг	Кут зустрічі, град.	Маса в момент влучання, кг	Швидкість в момент влучання, м/с	Довжина БЧ, м
5B55P / 5B55K (С-300)	60	90	647,50*	693*	1,813*
КРС 9М528 (осколково- фугасний “Торнадо-С”) /С-400 “Тріумф”	100*	90	196,00*	297*	1,9*
КАБ-500/ КАБ-500Т	304,2	90	534	277,78**	3,05
КАБ-1500Л	616	90	1500	222,22**	4,545
УПАБ-1500Б-Э	700	90	1525	277,78**	5,05

*величина припущена на основі аналогів;

**для авіабомб швидкість у момент влучання прийнята такою, що дорівнює максимальній.

Основною спільною рисою наведених ЗПН є можливість їх неодноразового влучання у конструкцію об’єкта, який захищають. Найефективнішою мірою захисту об’єктів є віддалення можливої точки влучання, тому ОКИ мають бути розташовані за межами досяжності вказаних ЗПН – близько 100 км для неможливості ураження С-300, С-400/“Торнадо-С” та 50...75 км для плануючих бомб. Очікувано, що нарощування систем ППО в Україні, та надання іноземними партнерами літаків типу F-16 із далекобійними ракетами дасть змогу уражувати наземні і повітряні засоби пуску, а після перемоги України смуга безпеки має бути розташована по території РФ та РБ. Надалі як головні чинники загроз від ЗПН противника будемо розглядати тільки БпЛА типу “Shahed-136” балістичні та аеробалістичні ракети оперативного рівня.

2.2. Особливості і спроможності нанесення повітряних ударів Російською Федерацією по енергетичній критичній інфраструктурі України

Розподіл ОКИ енергетичної галузі по території України характеризується нерівномірністю та відносною високою зосередженістю в окремих регіонах (рис. 2.15). Цей факт, а також велика протяжність кордону та лінії зіткнення із РФ, кордону із РБ, і відповідно малий час підльоту ЗПН роблять об’єкти уразливими до ударів противника.

За результатами спостережень з’ясовано, що РФ неперервно змінює тактику застосування ЗПН, варіюючи цілі, залучені носії, кількість та порядок запуску засобів, застосування хибних цілей, радіорозвідки, постановлення радіоперешкод тощо.

Умови нанесення повітряних ударів РФ вочевидь можуть варіюватися залежно від багатьох чинників, включно із погодою, розташуванням об’єктів, особливостями їх захисту, можливостями нанесення і метою атаки.



Рис. 2.15. Основні об'єкти критичної інфраструктури паливно-енергетичного комплексу на мапі України

Однак можна виокремити кілька особливостей тактики нанесення повітряних ударів РФ по енергетиці України:

1) забезпечення максимального ефекту – РФ намагається спрямувати свої удари по найбільш уразливих об'єктах, таких як головні електростанції та підстанції, щоб забезпечити максимальний ефект атаки;

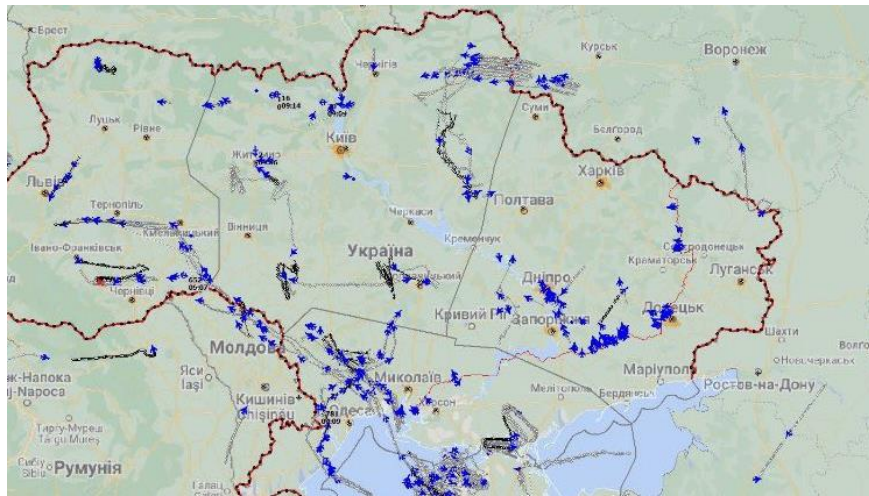
2) економія ЗПН та їх носіїв – через значну обмеженість наявної кількості ЗПН та їх носіїв, фізичну зношеність та вичерпність ресурсу РФ змушена концентрувати напади за територіальними і часовими параметрами;

3) комплексність атак – РФ використовує різні типи літаків, БПЛА та ракет, щоб забезпечити комплексні атаки на енергетичну інфраструктуру і збільшити їх ефективність.

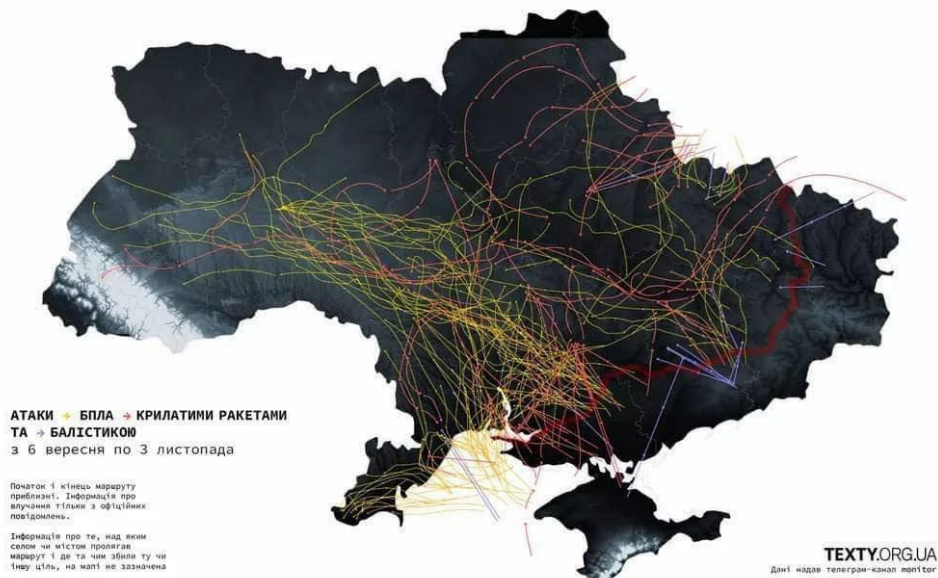
4) використання РЕБ та інших засобів – РФ використовує електронні засоби, щоб зменшити ефективність систем ППО України та забезпечити більшу точність своїх ударів. Супутникова й агентурна розвідка, аерофотозйомка, моніторинг кіберпростору широко застосовується РФ для уточнення результатів нападів і коригування сценаріїв подальших атак;

5) нерегулярність і нешаблонність нападів – здебільшого напад використовують як засіб залякування або відповіді на успішні дії ЗС України, іноді приурочують до специфічних дат, але в цілому їх складно передбачити. Траєкторії керованих ракет та БПЛА противника при цьому можуть пролягати непрямыми, обхідними маршрутами, у низинах, над річками і

дорогами для обходження системи ППО України та введення у оману (рис.2.16) [21].



a



б

Рис. 2.16. Траєкторії ЗПН РФ при атаках 10.10.2022 р. (а) та із 6.9.2023 по 3.11.2023 (б)

Зібрана статистика повітряних ударів РФ по енергетичній критичній інфраструктурі України відображає перелічені особливості їх тактики (рис. 2.17). Проте слід зважати й на те що, крім оперативного планування, на особливості повітряних ударів РФ істотно впливають політичні чинники всередині РФ, виробничі потужності та можливість імпортування БпЛА, ракет, або/і їх компонентів противником.

Окремі відомі дані про орієнтовні запаси та можливості виробництва ракет РФ наведені у табл. 2.7. В середині 2023 року стало відомо, РФ частково побудувала, а частково будує нові заводи і наростила виробництво ракет та БпЛА типу “Шахід” (рис. 2.18). Це є новими викликами для України, зокрема у сфері захисту критичної інфраструктури і підтверджує важливість нарощування кількості систем ППО та безперечно, інженерного захисту ОКІ.

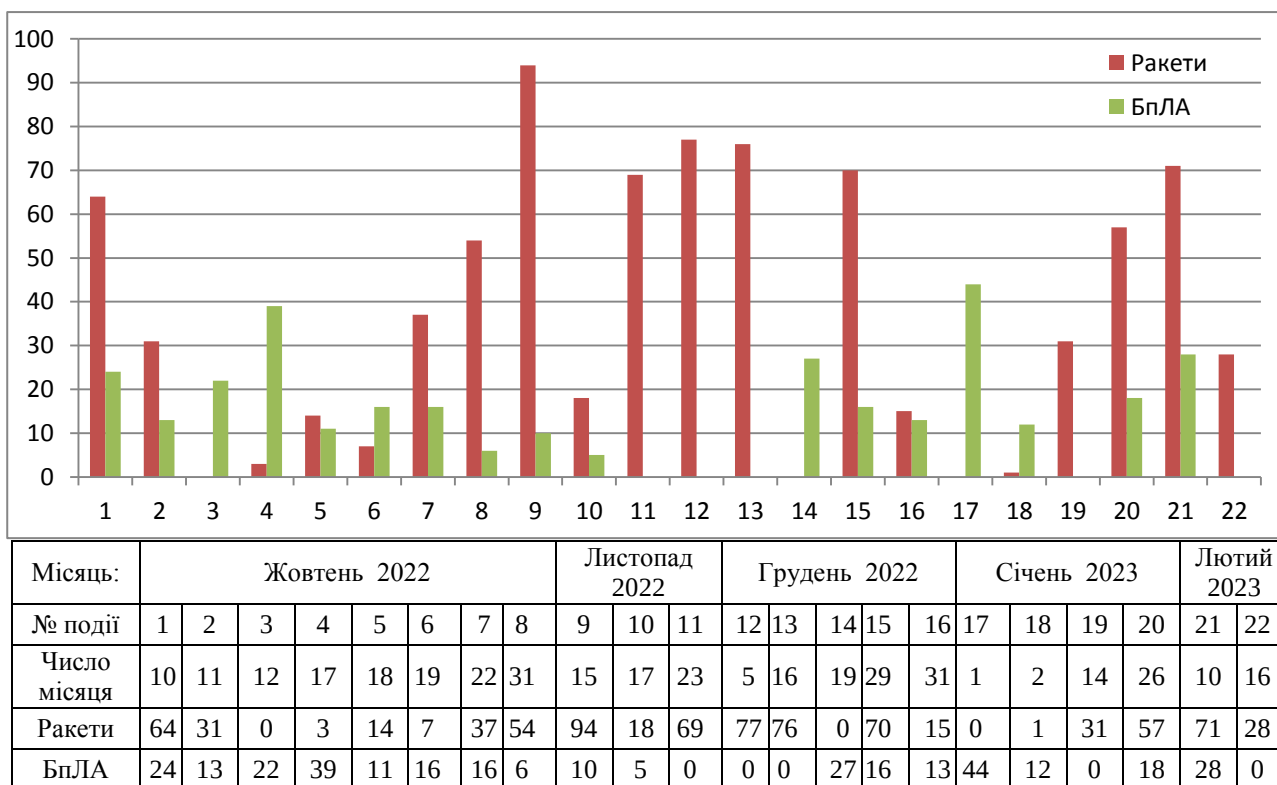


Рис. 2.17. Статистика застосувань ЗПН РФ проти ОКІ енергосектору за осінь–зиму 2022–2023 року

Таким чином, РФ має достатні спроможності для завдання повітряних ударів по енергетичній КІ України ще протягом тривалого часу. Наявні дані про виробництво дають змогу прогнозувати продовження тактики накопичення ракет та їх змішаного використання складських запасів та новітнього виготовлення.

Таблиця 2.7

Окремі відомі дані про орієнтовні спроможності РФ з виробництва ракет (станом на середину 2023 року)

Тип ракети	Комплекс	Орієнтовна відома спроможність з виробництва
9М723	“Іскандер”	5
9М728	“Іскандер”	2
3М-14 “Калібр”	Морські носії	25
Х-101	Ту-160, Ту-95	35
Х-555, Х-55СМ	Ту-160, Ту-95	–
Х-22, Х-32	Ту-22М3М	–
Х-47М2 “Кинджал”	Міг-31К	6
3М-55	“Бастіон”	–
5В55	С-300П	–
Х-29, Х-31, Х-35, Х-58, Х-59	Су-30, Су-34, Су-35	45
Разом		118

Щодо БпЛА навіть прогнозовано оцінити спроможності поки що неможливо. За різними даними, Росія отримала на початку осені 2022 року до кількох тисяч БпЛА-камікадзе іранського виробництва [23].

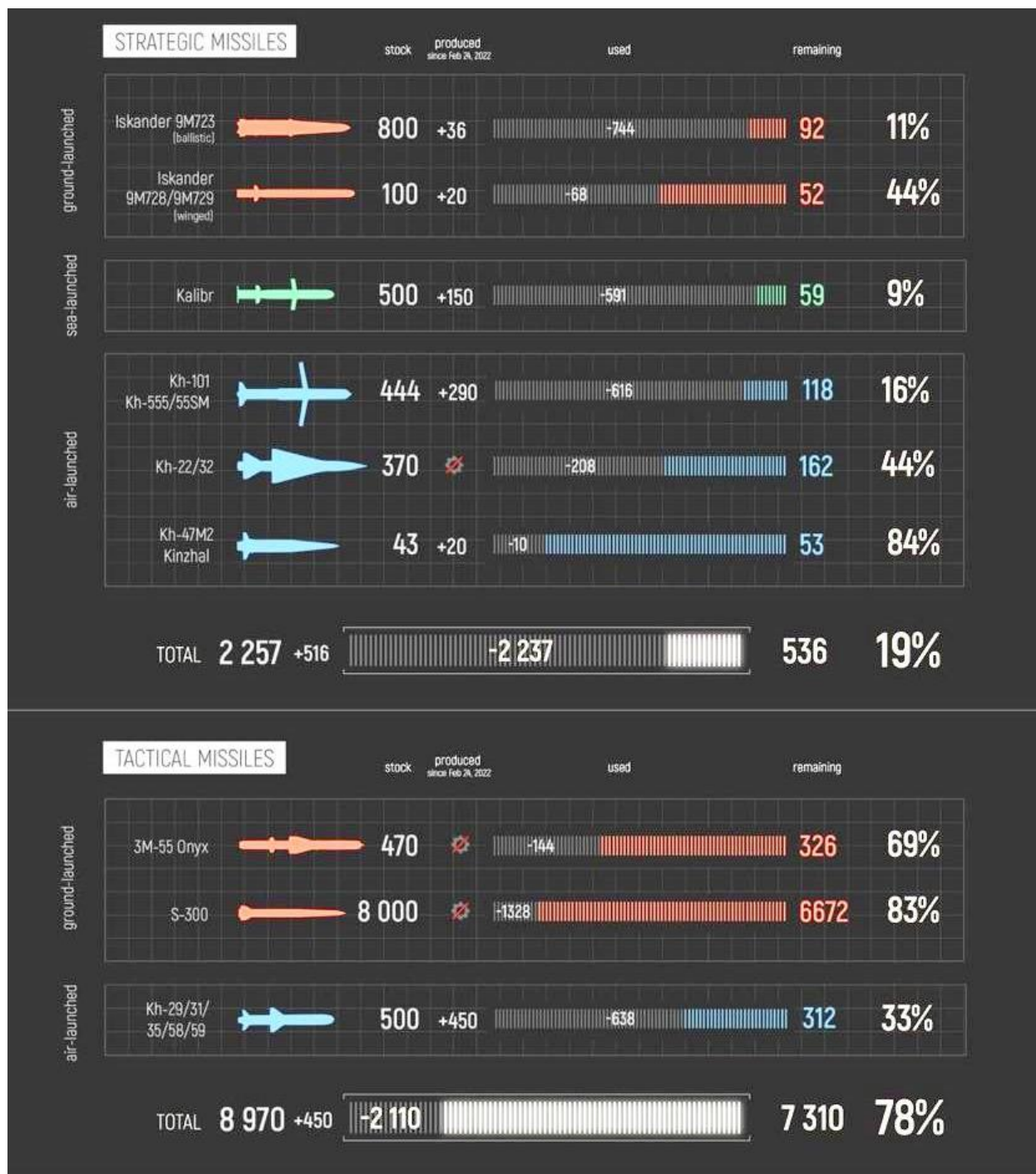


Рис. 2.18. Окремі відомі дані про орієнтовні запаси ракет у РФ (за даними Міноборони України) [22]

Ще кілька десятків або сотень БпЛА на місяць може постачати Іран або/та їх збирають на потужностях РФ. Так, зокрема, влітку 2023 року РФ локалізувала виробництво “Shahed-136” на новому заводі у Татарстані за р. Волгою (промислово-економічна зона “Алабуга”). Заявлена потужність – до 3000 БпЛА/рік [24]. Також можемо спостерігати значну інтенсифікацію

польотів та судноплавного сполучення між РФ та Іраном, що вказує на постачання компонентної бази для виробництва іранських БпЛА. Вочевидь, для компенсації витрачених ЗПН противник буде нарощувати власне виробництво БпЛА щоби компенсувати ракети, більшість із яких вже давно не виробляють на території РФ або їх виготовлення потребує застосування підсанкційних компонентів. Очевидно, що постачання компонентів високоточних ЗПН або навіть самих ЗПН доки можливе в РФ також через треті країни-посередники або країни-виробники, країни у яких ці засоби стоять на озброєнні (Китай, Півн.Корея та інші).

Характер ураження елементів ОКІ енергетичної галузі України залежить від особливостей елемента ОКІ, параметрів ЗПН, ефективності системи ППО та ступеня інженерної захищеності елемента ОКІ (рис. 2.19–2.21).



Рис. 2.19. Результати уражень ЗПН елементів ОКІ енергетичної галузі України: трансформатори

Так, для елементів енергетичного розподілу характерними пошкодженнями є: пробиття осколками стінок трансформаторів, реакторів та баків-розширювачів на них, що призводять до виливу мастила і можливої подальшої пожежі, розбиття осколками та ВУХ ізоляції на бушингах, що призводить до короткого замикання, руйнування систем пожежного захисту і протипожежних стін, обриву ЛЕП, руйнування опор, спричиняє припинення постачання електроенергії (див. рис. 2.19).



Рис. 2.20. Результати уражень ЗПН елементів ОКІ енергетичної галузі України: машинні зали ТЕС/ТЕЦ

Ураження ЗПН противника будівель і споруд (наприклад, машинних залів ТЕС/ТЕЦ, пунктів управління) характеризується такими пошкодженнями: пробиття та обвали конструкцій покриттів, стін і перекриттів, первинні і вторинні пожежі робочого обладнання, ємностей та устаткування, ураження місць знаходження або укриття персоналу, вторинні

ушкодження від уламків скла, виколювання бетонних і цегляних елементів, порушення комунікацій тощо. Тріщини та пробиття призводять також до порушення герметичності огорожувальних конструкцій, що може спричинити зниження продуктивності або призупинення функціонування внутрішнього обладнання (див. рис. 2.20).



Рис. 2.21. Результати уражень ЗПН енергетичної галузі України: резервуари та ємності нафтопродуктів

Наземні трубопроводи, резервуари та ємності із горючими рідинами та газами, застосовують на багатьох типах ОКІ енергетичної галузі України. Внаслідок ураження ЗПН противника ці об'єкти зазнають таких характерних пошкоджень: виливання рідин та газів з ємностей, займання і нищівні пожежі та вибухи, які призводять до значного руйнування елемента і пошкоджують суміжні та прилеглі елементи й устаткування ОКІ.

Наведені вище результати уражень елементів ОКІ ЗПН противника підкреслюють важливість систем інженерного захисту, як основної складової національної безпеки України та потребують інтегрального системного підходу до їх впровадження в усіх стратегічних галузях.

РОЗДІЛ 3. СИСТЕМИ ІНЖЕНЕРНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ ЗА ПРИНЦИПОМ “КРАЇНА-ФОРТЕЦЯ”

3.1. Ретроспективний огляд інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури

Історія застосування укріплених споруд відображає тисячолітній конфлікт між захисником і нападником. Щодо укриттів критичної інфраструктури це пов'язано із прогресом у розвитку трьох компонентів: 1) ролі енергетики як галузі господарства; 2) засобів нападу противника; 3) технічних можливостей інженерного захисту об'єктів.



Рис.3.1. Прадавні стратегічні укриття: *а* – Деринкую (Туреччина); *б* - Барабар (Індія); *в* – Лунь-ю (Китай); *г* – Шахта Осіріса (Єгипет)

Перший етап розвитку укриттів можна назвати доісторичним. У ті часи ймовірно майже всі елементи інфраструктури були критичними для існування спільнот, а енергетична галузь не відокремлена від загального господарства.

Тривалий час підземні, або улаштовані в горизонтальних печерах укриття лишалися єдиними надійними місцями, що давали одночасно захист як від зовнішніх загроз, так і від погодних умов для цивілізацій минулого. Відомим історичним фактом є у давні часи групи з 900 палестинців захист від римської армії на плато Madder, на об'єкті "Massada", який існує й до цього часу. Чоловіки, жінки та діти, не всі з яких були бійцями, стримували 15 000 легіонерів. Римлянам довелося розробити спеціальний таран для атаки споруди.

Підземні міста до 30 рівнів завглибшки відомі у прадавній Туреччині (Деринкую, Невшехір тощо); глибинні печери у Індії (печери Барабар [1]) та Китаї (печери Лунь-ю [2]), підземні бункерні споруди Єгипту (шахта Осіріса та ін.), споруди в інших країнах слугували для укриття від невідомих загроз, співмірних з ядерними [3, 4] (рис. 3.1).

Нетривіальним напрямом розвитку захисту критичних об'єктів було їх винесення на скельні або гірські плато. За такими принципами, наприклад, улаштовані комплекси Мачу-Пікчу у Перу, Сигірія на о. Шрі-Ланка, численні храми в Азії (рис. 3.2). При цьому засоби ураження противника, найнебезпечнішими з яких були кінетичні (балісти, луки, катапульти), не становили істотної небезпеки для подібних споруд, а високогірність ускладнювала виявлення розвідкою та доступ піхоти.



Рис. 3.2. Підвищення як інженерний спосіб влаштування недоступності до критичних об'єктів: *а* – Мачу-Пікчу (Перу), *б* – Сигірія (Шрі-Ланка)

В пізні античні часи VIII–VI сторіччя до н.е. грецькі міста-поліси, зокрема Спарта й Афіни, через особливості рельєфу, можливості морського сполучення та господарський устрій Давньої Греції набули ефективності, як високоавтономні економічні та військові одиниці (рис. 3.3, *а*). Зосередження у місті-полісі ключових елементів інфраструктури зумовлювало їх значну

стійкість під час облог та нападів противників як із суші, так і з моря, до якого ці міста прилягали [5].



Рис.3.3. *а* – Типове приморське місто-поліс Давньої Греції; *б* – легендарне місто-фортеця Каркассонн у Франції

Другим етапом розвитку підземних укриттів можна назвати фортифікаційне будівництво в епоху середньовіччя, коли далекобійні засоби ворога кінетичної дії (гармати, требушети) вже могли уразити критичні елементи замку під час облоги (криницю, пороховий склад, казарми тощо), і їх розміщували під землею або за товстими багаторядними мурами. Одним із яскравих прикладів можна назвати легендарне місто-фортецю Каркассонн у Франції, яке неодноразово витримувало штурми й облоги в епоху Середньовіччя [6] (рис. 3.3, *б*). Фортеці та замки відігравали значну роль у захисті спільнот у середні віки, тому часто містили розгалужені підземні тунелі і споруди. Енергетична галузь у ті часи поступово стала виокремлюватися як самостійна ланка господарства, але не була такою критичною, як вода, провіант або безпека.

Третій етап розвитку укриттів пов'язаний насамперед зі зростанням ролі вогнепальної зброї, появою авіації та потужної артилерії, коли потреба в укритті критичних елементів міст стала нагальною, що найбільше відобразилося у створенні укриттів і бомбосховищ під час Першої і Другої світової воєн. Зазначимо, що через науково-технічну революцію та індустріалізацію у другій половині XIX ст., енергетична галузь стала провідною в інфраструктурі, сприяла механізації та забезпеченню найнагальніших потреб людства. Є кілька прикладів підземних оборонних споруд часів Другої світової війни, в яких інфраструктура відігравала ключову роль. Зокрема, Франція побудувала у 1930-х роках 235-кілометрову лінію Мажино, щоб зупинити будь-які можливі німецькі вторгнення (рис. 3.4). Кожен форт цієї лінії містив шести-семи рівневі оборонні бункери, у яких були розміщені казарми, медпункти, склади, боєприпаси, дизельні електрогенератори, а також залізничні сполучення і навіть підземні стоянки техніки та літаків. На Гібралтарі також була побудована оборонна споруда, з якої союзники могли контролювати вхід до Середземного моря, і яка пізніше стала платформою для нападів на війська Німеччини в цьому районі.

Комплекс включав кілометри тунелів і лікарень, склади боєприпасів, запаси кораблів, ремонтні майстерні та приміщення штабу.

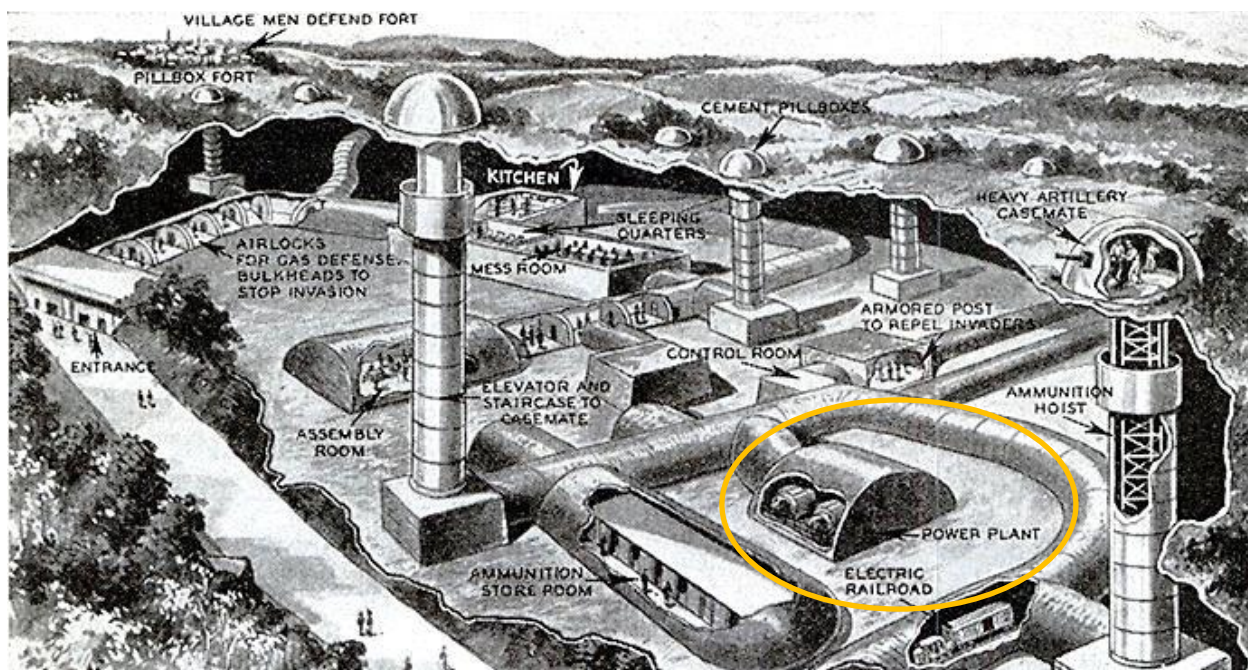


Рис.3.4. Лінія Мажино, схема форту Шонненбург (Франція). Обведено підземну електростанцію

Під час війни німці використовували відпрацьовані гірничі шахти для переміщення частини своєї військової промисловості через інтенсивні бомбардування союзників, а також намагалися виготовляти зброю масового ураження під землею, для чого створили комплекси із розвиненою інфраструктурою. Німецька ракета “Фау-2” була зібрана і запущена з підземного приміщення з укріпленим бетонним куполом товщиною 5 м. Багато доків для німецьких підводних човнів також були заглиблені та захищені інженерно. Союзники розробили спеціальні бомби вагою від 12 000 до 22 000 фунтів для нападу на такі надійні об’єкти.

Килимові бомбардування, а також масовані ракетні обстріли Лондона вплинули на рішення розмістити центри управління, генерації та інші важливі елементи під землею, змусили переглянути рівні і джерела загроз та саму філософію проектування інженерного захисту інфраструктури.

Четвертим етапом розвитку укриттів можна назвати період холодної війни. Після появи зброї масового ураження багато країн запровадили нові підходи до захисту насамперед енергогенеруючих підприємств, а також виробництв військового напрямку, громадських центрів тощо. Зокрема у Норвегії підземне розташування мають понад 200 гідроелектростанцій і тисячі дизельних генераторів (рис. 3.5) [7].

Аналогічні кроки зроблені у Швейцарії, Швеції, частково у Канаді та інших країнах. Наприклад, в епоху холодної війни шведи розмістили багато військових об’єктів у підземних спорудах – це стало своєрідною

скандинавською відповіддю на ймовірну загрозу застосування ядерної зброї, особливо із боку Радянського Союзу.

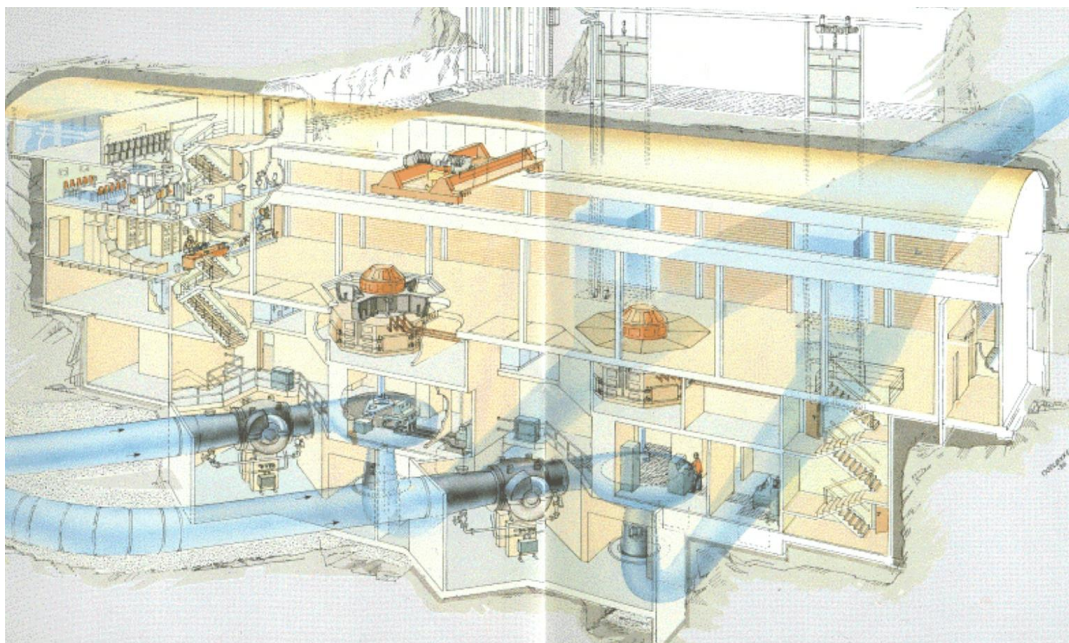


Рис. 3.5. Норвезька підземна гідроелектростанція

За конструкцією ці споруди були схожі на протирадіаційні сховища. Швеція не приховувала причини застосування підземних споруд для критичної інфраструктури; зрештою вся Скандинавія загалом почала розвивати підземне будівництво, орієнтоване на оборону, що стало великим імпульсом для цієї програми та розвитку заглибленої інфраструктури в світі. Задовольнивши оборонні вимоги, скандинави почали аналогічно захищати промисловість, щоб вона могла працювати однаково ефективно як у мирний, так і у воєнний час. На цей час саме у Скандинавії є багато підземних інфраструктурних споруд, у тому числі для об'єктів енергетики, які не пов'язані прямо з обороною, але мають відповідні інженерні захисні властивості. Деякі із них також були побудовані з огляду на естетичні, екологічні чи інші проблеми використання простору. Як конкретні приклади можна назвати підземні споруди для управління повітряним рухом, заглиблені телефонні станції, підприємства з очищення стічних вод, резервуари зберігання питної води, споруди для зберігання архівних матеріалів, пального, їжі, радіоактивних відходів тощо (рис. 3.6).

Нині можна стверджувати, що настав п'ятий етап розвитку інженерного захисту ОКІ, передумовою якого є:

- поява високоточних ЗПН противника;
- істотне збільшення швидкостей ЗПН противника, зокрема ракет;
- необхідність урахування вибіркової ЗПН щодо ураження цілей.

Із насиченням, ускладненням інфраструктури та глобалізацією з'явилися нові виміри у понятті її критичності і стійкості, а також нові виклики та загрози.

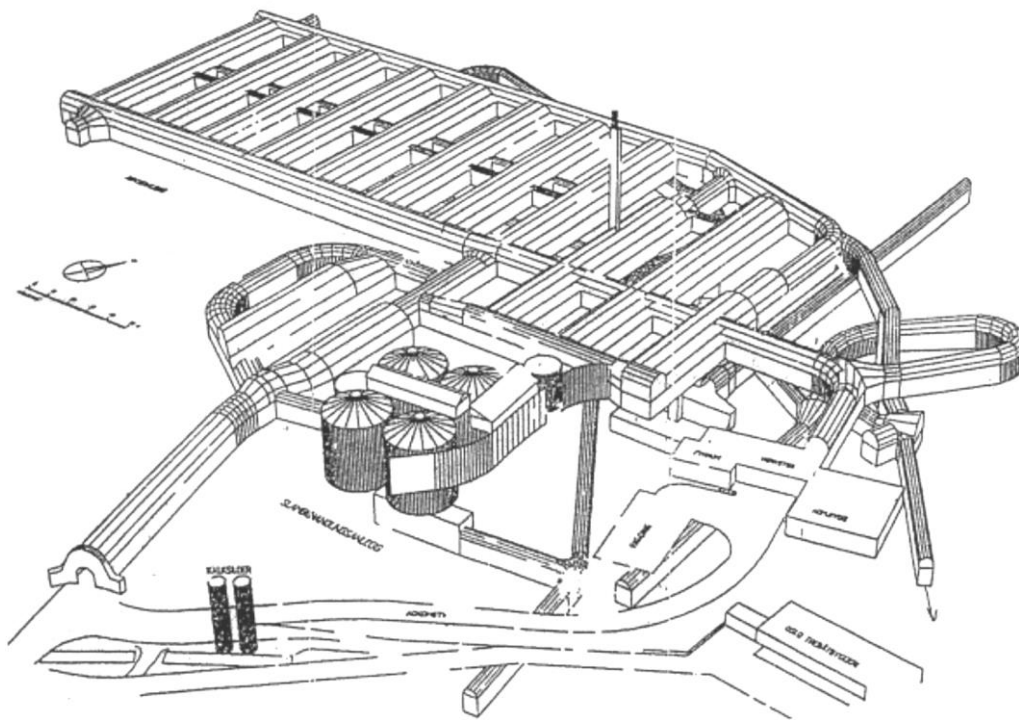


Рис.3.6. Норвезька підземна смітте-переробна станція

Сучасний погляд на підземний варіант захисту ОКІ почав формуватися наприкінці 90-х – на початку 2000-х років в зв'язку із поширенням міжнародного тероризму і появою кіберзагроз [8, 9]. Країнами, які використовували підземні споруди поза оборонними цілями для захисту критичної інфраструктури, тоді були лише Норвегія, Швеція, Фінляндія та Швейцарія. У цих країнах розроблено ґрунтовні програми підземного захисту ОКІ, тому доцільно скористатися їх знаннями та досвідом. Для прикладу, у Фінляндії побудовано понад 50 тис. бомбосховищ і 300 км. тунелів.

У США найбільше укритих ОКІ історично розташовані у штаті Канзас, тому що з давніх часів у ньому тривають гірськопрохідні видобування корисних копалин. На цей час приблизно 90% розвинутих та орендованих комерційних підземних площ у світі розташовані саме в районі Канзас-Сіті. Там державні і приватні установи орендують понад 30 млн. квадратних футів і щороку до них додають 2 млн. квадратних футів, доступних для розробки; в резерві наявні понад 300 млн. квадратних футів видобутого простору; приблизно 6 млн. квадратних футів щороку додаються до нового видобутку копалин. У Канзас-Сіті близько 50 підприємств працюють під землею, до роботи на них залучені близько 10 тис. працівників. Таким чином, інженерний захист ОКІ у світі розвинений нерівномірно, має широке історичне підґрунтя і реалізований переважно у вигляді підземного занурення об'єктів.

Основними перевагами підземного розташування ОКІ є:

- максимальний захист та візуальне маскування;
- відносно стабільне середовище, захищене від погодних умов;

– при використанні готових підземних споруд є значна економія на утепленні;

– річні витрати на електроенергію – приблизно 15% від витрат на будівлі, розташовані на поверхні землі, що є величезною економією. Економія пов'язана насамперед із відсутністю значних потреб на опалення та кондиціонування, також є можливість використання енергії тепла Землі.

Недоліками підземного розташування ОКІ є:

– висока вартість і час улаштування заглиблених споруд, якщо їх зводять з початку, без використання готових печер або штолень;

– необхідність облаштування додаткової вентиляції та систем життєзабезпечення для нормального функціонування ОКІ.

Такі країни, як Норвегія, Швеція, Японія і Китай, мають значний досвід високотехнологічних підземних будівництв. Ще в 1945 році Комісія з питань оборони та уряд Норвегії визначили ураження ОКІ як ключову загрозу національній безпеці. Відтоді Норвегія почала розробляти загальну систему оборони, яка об'єднувала військові та цивільні об'єкти, щоб запобігти переростанню критичних ситуацій у катастрофи. Основна частина програми була впроваджена із 1992 по 1993 роки, але на той час зусилля були зосереджені на кібератаках і збоях у банківській системі більше, ніж на інженерному захисті. Норвегія перша із країн світу встановила вимоги до надзвичайних ситуацій для ОКІ та принципи організації їх вирішення. У норвезькій моделі захисту ОКІ наголошено на тому, що критично важливу інфраструктуру потрібно захистити від всіх можливих засобів нападу противника, реалізувати ефективний цивільний захист для населення та організувати систему ремонтів пошкоджень, які можуть виникнути внаслідок влучань ЗПН у ОКІ. Служби, що опікуються цими напрямками, мають бути обов'язково включені до загальної системи оборони. Слід зазначити, що цивільна оборона у Норвегії дуже добре організована на національному, окружному та муніципальному рівнях. Її підготовленість охоплює такі основні напрями: забезпечення продовольством (для деяких товарів необхідний запас до 12 місяців); забезпечення водою; каналізація; екологічні загрози (наприклад, прорив дамб); одяг; логістика; енергія; промисловість і торгівля; комунікації, координація цивільної оборони, засоби масової інформації, радіо, поліція; системи будівництва.

Близько 75% населення Норвегії мають доступ до належних сховищ та укриттів. Велика частина енергетичних ресурсів зберігається під землею. У цій країні понад 200 підземних електростанцій, у тому числі пов'язаних енергооб'єктів, наприклад трансформаторів електричних розподільчих пристроїв. Багато нафтопереробних підприємств, складів паливно-мастильних матеріалів, насосних та автозаправних станцій також розташовані під землею. Крім того, вода, свіжі продукти, глибоко заморожені та охолоджені продукти зберігаються під землею із термінами придатності на кілька місяців, телекомунікації та системи управління повітряним рухом також захищені у підземних спорудах. Під поверхнею розташовані кілька

заводів з виробництва боєприпасів і продуктів харчування. Норвезька олімпійська підземна ковзанка на 5000 місць має ширину 62 м.

Під час можливої війни норвезькі компанії змінюють не свою організаційну структури; а форму. Передбачено використання підземних укриттів для військових штабів, політичних органів, управління цивільної оборони, органів керування зв'язком, автомобільним і залізничним транспортом. У Норвегії підземні укриття існують для армії, флоту, авіації та берегової оборони, а також для деяких союзників по НАТО (Великої Британії, Сполучених Штатів Америки, Нідерландів та Німеччини). Прибережне спостереження передбачено проводити з укриттів за допомогою висувних підземних антен і камер. Ракетне озброєння при цьому може бути розташоване над землею, а в разі потреби переміщене під поверхню за 8...10 с. У Норвегії є також багато підземних споруд подвійного призначення. У мирний час їх використовують як спортивні та плавальні басейни, у воєнний час їх можна швидко переобладнати під укриття або споруди іншого призначення. Так, у норвезькому місті Йовік (Gjøvik) на території підземного сховища розташовані хокейна ковзанка, штаб поліції та цивільної оборони, телекомунікаційний центр. Усі ці приміщення мають складні системи вентиляції та опалення. Вже протягом кількох десятиліть, Норвегія будує до 75 км. сучасних тунелів на рік. У горах також триває активне будівництво підземних споруд. Безперечно, у подвійному призначенні захисних укриттів є загроза втрати функцій або несвоєчасність їх приведення у відповідність до первинного призначення у разі виникнення загрозової ситуації. Проте для енергетичної галузі така небезпека мінімізована, тому що обладнання, і відповідно, споруди інженерного захисту використовують майже постійно, а технологічні умови зменшують можливості якогось іншого використання споруд. Із 90-х років ХХ ст. підземні та захищені в інженерному сенсі електростанції будують Канада, Індія, Японія, Китай, Південна Корея, Німеччина, Велика Британія, Ізраїль, Нова Зеландія та деякі інші країни [10] (рис. 3.7, 3.8).

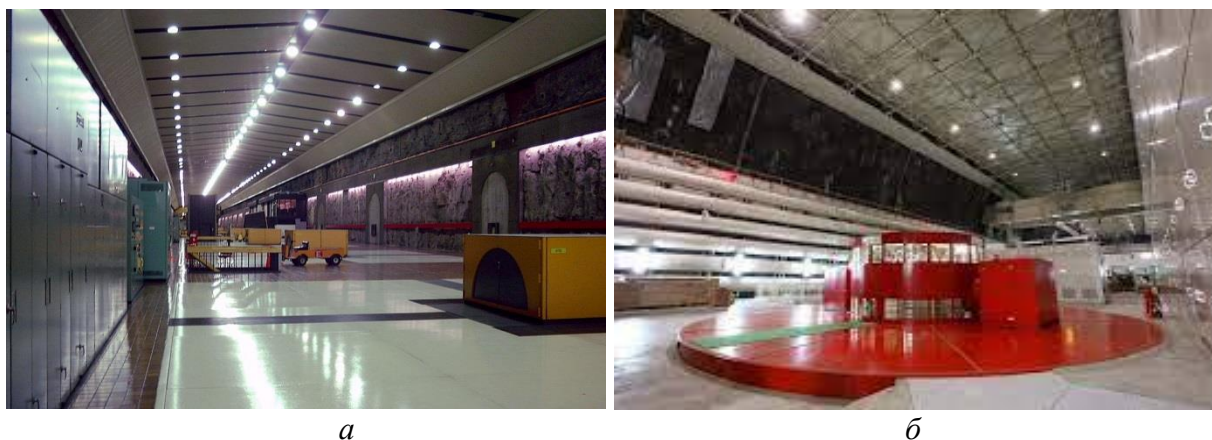


Рис.3.7. *а* – Електростанція “Robert-Bourassa”, у північному Квебеку (Канада) із встановленою потужністю 5,616 МВт; *б* – насосна акумулююча гідроелектрична станція “Kazunogawa” (Японія) із встановленою потужністю 1,600 МВт



Рис.3.8. Електростанції: *а* – насосна акумулююча електростанція “Fengning” (Китай) потужністю 3,6 ГВт; *б* – “Manapouri” із встановленою потужністю 854 МВ (Нова Зеландія)

Найновітніший період захисту критичної інфраструктури енергосектору характеризується збільшенням потужностей насамперед підземних об'єктів. Так, зокрема, Державна мережева корпорація Китаю як найбільший державний енергетичний оператор у 2022 році у провінції Хебей ввела в експлуатацію насосну гідроакumuлюючу електростанцію “Fengning”, потужністю 3,6 ГВт [11]. Можна передбачити, що зростання рівня нових загроз, зокрема від високоточних, автономних ЗПН із далеким радіусом дії, зумовить поглиблення тенденції до розвитку інженерних укриттів ОКІ енергогалузі, тому що у світі пропорційно збільшується запит на безпеку.

3.2. Концепція інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури за принципом “Країна-фортеця”

Питанням захисту ОКІ присвячена значна кількість наукових досліджень та публікацій. Досить повно питання захисту критичної інфраструктури у країнах Європи розглянуто у праці [12], в якій поєднано опис трьох основних напрямів: захисту від загроз у сфері державної безпеки (які можуть включати внутрішні загрози та фізичне знищення ОКІ); захисту від кіберзагроз і захисту від надзвичайних ситуацій. Масоване застосування противником ЗПН по ОКІ раніше вважали малоімовірною перспективою розвитку збройного конфлікту на території України, а повторюваність нанесення ударів протягом значного часу взагалі не бралися до уваги як можливий сценарій. При цьому поняття “інженерний захист” використовували переважно у працях та керівних документах з цивільного захисту [13]. У теорії воєнного мистецтва інженерна підтримка підвищення живучості та безпеки застосування військ (сил) та об'єктів в операціях (бойових діях) передбачала забезпечення “інженерного обладнання районів, позицій та рубежів” [15]. Однак у предметній галузі інженерного захисту ОКІ вказані поняття перетинаються та набувають оновленого змісту, що потребує

проведення додаткових наукових досліджень, вироблення дієвої системи, спрямованої на забезпечення стійкого функціонування енергетичної галузі України в умовах сучасних воєнних загроз. Тому тут і надалі під інженерним захистом ОКІ енергетичної галузі будемо розуміти сукупність заходів з інженерного обладнання елементів ОКІ з метою підвищення їх живучості, безпеки персоналу та стійкого функціонування електроенергетичної і газотранспортної систем, нафтовидобувної промисловості держави в інтересах забезпечення життєвих потреб суспільства.

Нам слід відбудувати і перебудувати країну так, щоб максимально зберігати ключові функції в умовах перманентних військових загроз – як прямого вторгнення, так і опосередкованих: ракетних ударів, терактів, диверсій, кібернетичних та інформаційних атак тощо. Такі виклики в умовах переважаючих сил противника потребують асиметричних відповідей на його дії, довгострокових візій і програм розвитку на рівні держави. Вбачається, що побудова ефективної оборонної демократії в оновленій Україні має відповідати трьом принципам: захищеності, економічності та екологічності.

“Країна-фортеця” – концепція, запропонована авторами, покликана забезпечити інтегральний захист національних інтересів, території, об’єктів, громад, спільнот, екосистем, окремого громадянина, в тому числі від факторів ураження ЗПН. У практичній площині це означає насамперед цивільний захист, стійкість інфраструктури, систем життєзабезпечення, безпеку міського середовища тощо.

Як було зазначено у Розд.1, кожен ОКІ становить комплекс елементів, об’єднаних забезпеченням єдиного функціоналу, і складається з устаткування та споруд, які мають різний ступінь відповідальності. Відтоді кожен елемент потребує індивідуального підходу.

Побудова ефективної системи захисту ОКІ є пріоритетним завданням держави. Як активний захист, так і пасивний, в основі якого є інженерний захист ОКІ – розглядається сьогодні як загальносвітова проблема, тому що масштаби застосування ЗПН РФ по ОКІ України не мають аналогів за масштабами, демонструючи тенденції та виклики війн майбутнього [12, 13].

Концепцію “Країна-фортеця” передбачається реалізувати протягом 2022–2027 років. Як було зазначено вище, аналоги подібної концепції вже започатковані в Норвегії, Швеції, Швейцарії, Китаї, Ізраїлі та інших країнах [15]. Проте у таких масштабах, як в Україні (за рівнем загроз, кількістю уражень ОКІ, потребою захисту), проблему системно розглянуто вперше [16].

Згідно з концепцією “Країна-фортеця” інженерний захист ОКІ від чинників ураження ЗПН противника поділяють на три рівні: 1) тимчасові захисні споруди для первинного, часткового захисту елементів ОКІ у разі поодинокого непрямого влучання ракет і непрямого влучання БпЛА противника; 2) споруди, які витримують поодинокі прямі влучання БпЛА, а також поодинокі непрямі влучання ракет противника; 3) заглиблені споруди,

призначені для захисту від поодинокого прямого влучання ракет і БпЛА противника.

За термінами досягнення цілей організаційно-технічні заходи можна розподілити на короткострокові (першочергові) – до одного місяця; середньострокові – до одного року та довгострокові – 2...5 років (рис. 3.9).

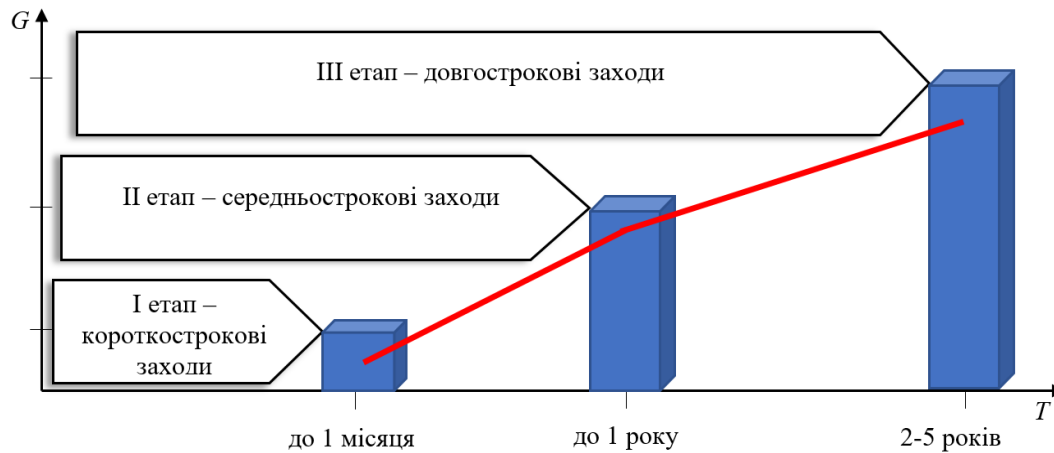


Рис.3.9. Очікуваний приріст живучості відповідно до етапів реалізації концепції інженерного захисту ОКІ енергетичної галузі України

Короткострокові (першочергові) заходи інженерного захисту призначені для зменшення ймовірності ураження основних елементів ОКІ від уламкової та фугасної дії продуктів вибуху ЗПН противника. До короткострокових (першочергових) організаційно-технічних заходів належать: планування характеру та обсягів інженерного захисту ОКІ на основі аналізу прогнозних оцінок щодо можливого застосування противником ЗПН; розроблення індивідуальних або типових інженерно-технічних рішень щодо споруд першої черги для елементів ОКІ; забезпечення потрібними матеріально-технічними засобами (включаючи підручні матеріали) та іншими ресурсами; зведення інженерних споруд; експлуатація інженерних споруд з урахуванням технологічних вимог ОКІ; ліквідація наслідків повітряних ударів противника та відновлення пошкоджених інженерних споруд на ОКІ.

Метою середньострокових заходів інженерного захисту є мінімізація збитків від ураження ОКІ шляхом зведення надповерхневих інженерних споруд підвищеного ступеня захисту. До середньострокових організаційно-технічних заходів належить проєктування і виготовлення елементів інженерних споруд підвищеного ступеня захисту; забезпечення потрібними матеріально-технічними засобами; зведення інженерних споруд підвищеного ступеня захисту; експлуатація інженерних споруд на ОКІ; виконання інженерних заходів щодо введення противника в оману демонстративними діями стосовно наслідків повітряних ударів; ліквідація наслідків повітряних ударів противника та відновлення пошкоджених інженерних споруд; здійснення контролю заходів щодо удосконалення інженерного захисту ОКІ другої черги.

Досягти надійного захисту ОКІ від ураження у разі прямого влучання в них ЗПН можливо тільки завдяки довгостроковими заходами інженерного захисту, шляхом підземної урбанізації із опорою на існуючу забудову із перенесенням елементів ОКІ до заглиблених захищених приміщень. До довгострокових організаційно-технічних заходів належать: проєктування підземних інженерних споруд для інженерного обладнання елементів ОКІ; забезпечення потрібними матеріально-технічними засобами; зведення підземних інженерних споруд з максимальною опорою на існуючу забудову місцевості із складанням технічної документації та обліку матеріальних засобів; встановлення нового та перенесення існуючого технологічного обладнання до підземних інженерних споруд; експлуатація інженерних споруд на ОКІ; здійснення контролю заходів щодо удосконалення інженерного обладнання ОКІ третьої черги.

Для впровадження концепції “Країна-фортеця” вже здійснено низку заходів, зокрема розроблено методичні рекомендації та типові рішення із проєктування фізичного захисту ОКІ; здійснюється навчання відповідних фахівців в Україні та за кордоном; ведеться будівництво пілотних проєктів тощо [17]. У 2023 році концепція “Країна-фортеця” була прийнята на державному рівні.

3.3. Опис основних конструктивних рішень першого рівня захисту

Захист першого рівня – це первинне убезпечення існуючих елементів та устаткування ОКІ від дії факторів ураження ЗПН противника у разі непрямих влучань на певній відстані від цільового елемента об’єкта. Таку відстань можна дізнатися коли точно відомий тип ЗПН противника, його тактико-технічні характеристики, або на основі статистики реальних влучань.

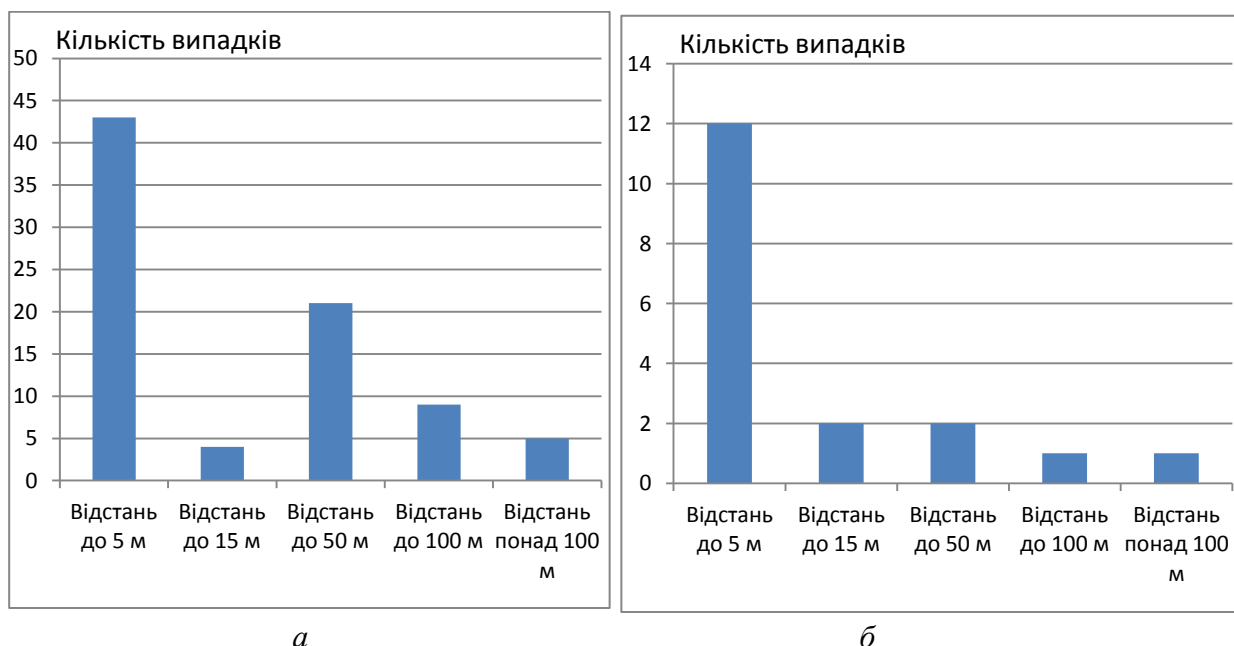


Рис.3.10. Статистика влучань ЗПН із розподілом по відстані до елемента ОКІ: *а* – ракет; *б* – БпЛА

Наприкінці 2022 року автори розробили спеціалізовані чеклісти зі збирання технічної інформації за результатами влучань ЗПН в ОКІ. Отримані дані для БпЛА та ракет дали змогу визначити особливості розподілу відстаней від точки влучання до імовірного цільового елемента ОКІ (рис. 3.10).

Із гістограм на рис. 3.10 можна визначити, що точність БпЛА у разі влучань значно вища, ніж у ракет. Також на графіку (рис.3.10) для ракет спостерігається аномалія розподілу (мала кількість випадків влучань на віддалі від 5 до 15 м). Це може пояснюватися особливостями системи наведення деяких ракет, які помилково визначають ціль у разі наближення до ОКІ, і відповідно середніми відстанями розташування критичних елементів на території ОКІ між собою.

Отже, відстань від цільового елемента об'єкта до місця непрямого влучання може бути прийнята для БпЛА типу “баражуючий боєприпас” – 5 м, а для ракет – 15 м. Факторами ураження при цьому є насамперед первинні та вторинні осколки і вибухова ударна хвиля.

Основними особливостями зведення та виконання будівельних робіт для більшості елементів енергетичної галузі, є:

- необхідність уникнення ударних навантажень та вібрацій;
- бажане уникнення розуцільнення ґрунту;
- потреба врахування можливого перегріву агрегатів та установок за умови їх прикриття захисними спорудами;
- необхідність залишення технологічних коридорів для обслуговування;
- наявність підходу патрубків, супутніх комунікацій, врахування вимог правил експлуатації електричного та іншого оснащення;
- необхідність врахування стисненості забудови, щогл, порталів, опор, електродротів;
- потреба у вентиляції, провітрюванні агрегатів та установок;
- мінімізація зварювальних робіт та робіт із застосуванням відкритого полум'я;
- неможливість проведення піротехнічних робіт.

Інженерні споруди першого рівня захисту згідно зі своїм призначенням мають відповідати таким критеріям:

- ресурсодоступність та швидкість виготовлення і монтажу;
- простота і невисокий рівень технологій захисту, їх максимальна локалізація;
- високий рівень живучості та ремонтпридатності елементів у разі уражень, взаємозамінність;
- відсутність або мінімізація технологічних зупинок обладнання під час облаштування систем захисту;
- гнучкість у застосуванні, модульність, уніфікація та типізація, можливість захисту різних елементів;
- максимізація захисту за умови мінімізації витрат ресурсів;

– можливість демонтажу, висока мобільність.

Згідно з наведеними вимогами наразі використовують декілька варіантів конструктивного інженерного рішення із первинного захисту елементів ОКІ першого рівня. Для бічного часткового захисту елементів поширеним є використання пірамідоподібних споруд із фортифікаційних габіонів, іноді із бігбегів, мішків, бетонних, залізобетонних і металевих збірних елементів тощо. Такий тип захисту є частковим, тому що він не захищає елемент ОКІ у верхній проекції. Конструктивна композиція систем інженерного захисту першого рівня ОКІ має бути такою, щоб забезпечувати “затінення” від дії ВУХ на елемент.

Системи захисту першого рівня можна умовно розділити за матеріалом: металеві, дерев’яні, бетонні, залізобетонні, ґрунтомістки. Найчастіше використовуються комбіновані захисні конструкції. Монолітні, дрібноштучні, кам’яні конструкції зазвичай не використовуються для першого рівня захисту, тому що не відповідають вимогам швидкості і мобільності. Типологія споруд першого рівня захисту із аналізом основних переваг та недоліків наведена у табл. Д. 3.1 [18, 19, 20].

Також до першого рівня захисту належить посилення і збільшення живучості існуючих конструкцій будівель та споруд або внутрішнього устаткування влаштуванням металевих кожухів, обкладенням цеглою, встановленням додаткових опор тощо. На практиці можуть застосовуватися комбіновані конструкції першого рівня, наприклад, обвалування елемента ОКІ із подальшою підготовкою основи і встановленням на це обвалування конструкцій із габіонів; формування подвійних стін із залізобетонних блоків із засипкою ґрунтом або щебнем.

Номен- клатура	Висота, м	Ширина, м	Довжина, м
Mil1	1,37	1,06	10
Mil2	0,61	0,61	1,22
Mil3	1	1	10
Mil4	1	1,52	10
Mil5	0,61	0,61	3,05
Mil6	1,68	0,61	3,05
Mil7	2,21	2,13	27,74
Mil8	1,37	1,22	10
Mil9	1	0,76	9,14
Mil10	2,21	1,52	30,5
Mil11	1,22	0,3	1,22
Mil12	2,13	1,06	33
Mil19	2,74	1,06	3,18

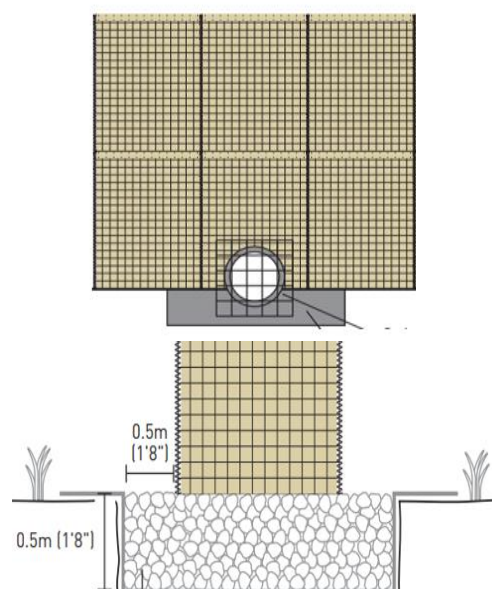


Рис. 3.11. Типологія розмірів стандартних габіонних конструкцій [21]; улаштування водостоку, щебеневої подушки

З огляду на співвідношення переваг та недоліків, найперспективнішими для першого рівня захисту є **габійні конструкції**. Велика типологія їх розмірів (рис. 3.11) дає змогу комбінувати та зводити захисні стіни широкого спектру висот та конфігурацій.

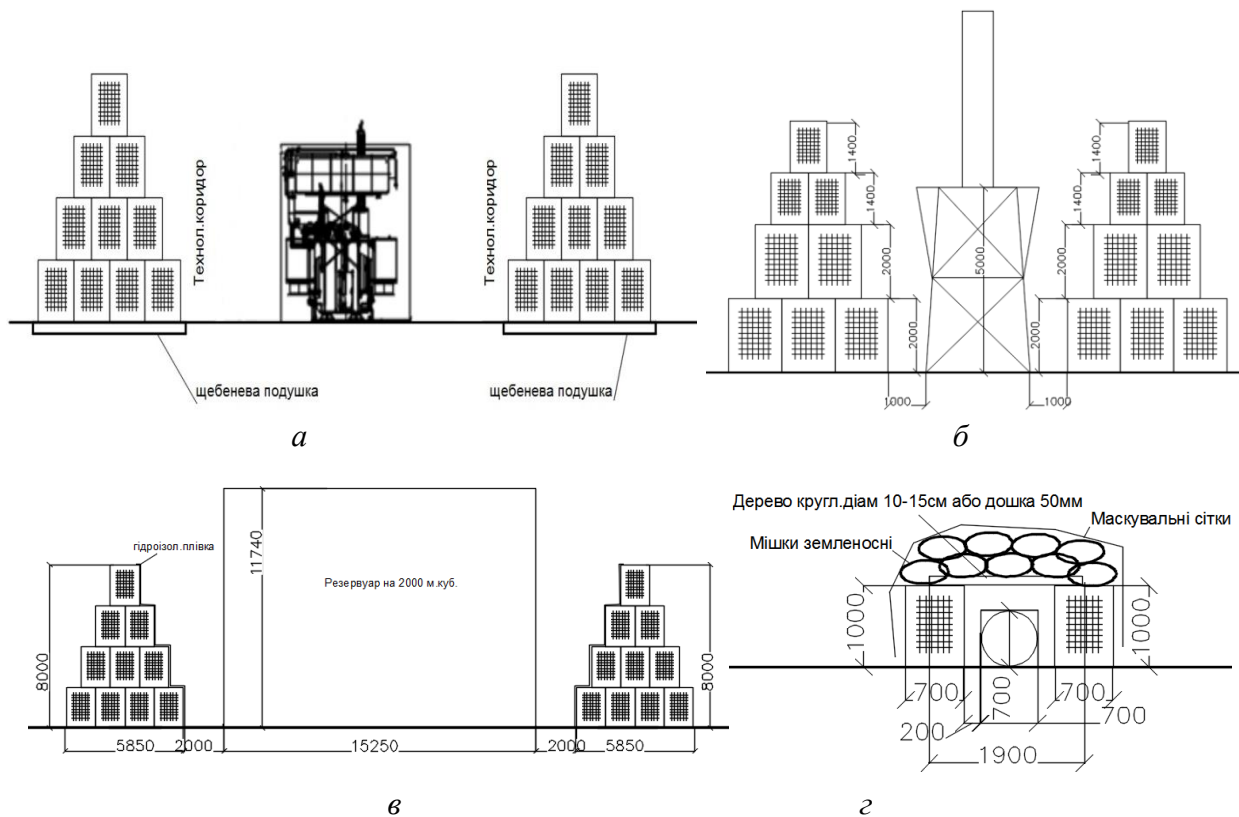


Рис. 3.12. Загальний вигляд перерізу захисних споруд першого рівня із використанням габйонів: а – трансформатора; б – газової установки; в – нафтового резервуару; г – трубопроводу

Загальний порядок дій щодо встановлення укриттів з використанням габйонних конструкцій такий:

1. Розрахунок та розмітка на місцевості, вирівнювання ділянок для встановлення елементів споруди.
2. Підсилення основи під габйони за потреби щебеневою подушкою.
3. Встановлення габйонів.
4. Завантаження габйонів піском (грунтом) з пошаровим ущільненням.
5. Встановлення додаткових рівнів габйонів зверху.
7. Маскування сіткою/обвалування ґрунтом.

Під час проектування та монтажу габйонів слід керуватися настановами виробника та відомими посібниками [21], влаштовуючи, де це необхідно, щебенеvu подушку (як правило, якщо висота споруди три рівні габйонів і вище), дренажні проходи для води, контрфорси, пілястри (рис. 3.11–3.13).

Під час улаштування конструкцій слід також зважати на технологічні обмеження, можливості проведення робіт, режим роботи обладнання тощо.



a



б



в



г

Рис. 3.13. Приклади інженерного захисту елементів ОКІ за першим рівнем на реальних об'єктах: *а-в* – із застосуванням габіонних конструкцій; *г* – металевих листів

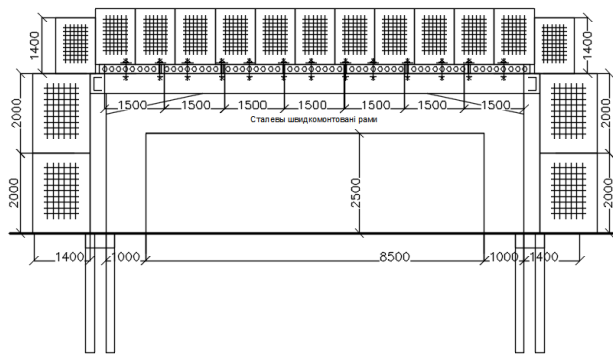


Рис. 3.14. Комбіновані споруди за першим рівнем захисту із рамних конструкцій, плит та габіонів: схема, металеві рами та приклади захисту елемента ОКІ

Також під час проєктування слід мати на увазі, що консольні стіни із габіонів забезпечують лише частковий захист у разі непрямого влучання від факторів ураження ЗПН, таких як осколки, які можуть перелетіти стіну по

балістичній траєкторії, а також ВУХ, яка після певної відстані за стіною (біля 3...6 розмірів її висоти) знову діє зі значним тиском.

Якщо елемент ОКІ критично необхідно закрити зверху, то за умови невеликих прольотів можливе застосування допоміжних металевих конструкцій – рам, ферм, на які зверху встановлюють також габіони із заповненням ґрунтом або інші елементи. Для перекриття можуть застосовуватися збірні залізобетонні плити або металеві листи тощо.

При цьому слід враховувати розташування обладнання, технологічні обмеження, зокрема щодо накопичення газів, перегріву устаткування і т.п. Такий інженерний захист належить до першого рівня як протиосколковий від непрямих влучань ЗПН, але має поліпшені властивості.

Порядок дій щодо встановлення наведеної на рис.3.14 споруди такий:

1. Розрахунок та розмітка на місцевості для встановлення елементів.
2. Улаштування фундаментів.
3. Встановлення металевих швидкокомонтованих рам зі сталі.
4. Монтаж сталевих листів з отворами.
5. Монтаж залізобетонних плит перекриття.
6. Дрилення отворів у плитах перекриття і стягування із листами за допомогою шпильок, функцію розподільчих шайб виконують смуги сталі зверху плит. Для порожнистих плит отвори мають збігатися або потрапляти на порожнини чи проміжки, а не на ребра.
7. Встановлення бічних габіонів.
8. Завантаження габіонів піском (ґрунтом).
9. Встановлення додаткових габіонів із піском зверху.
10. Засипання простору між габіонами на покрівлі ґрунтом.
11. Маскування сіткою/обвалування ґрунтом.

Під час влаштування споруд першого рівня слід враховувати технологічні зазори для обладнання і умови електротехнічної безпеки, залишати проходи у захисті для оперативного доступу підрозділів пожежогасіння та для зручнішого технологічного обслуговування обладнання, яке захищається, при цьому улаштовуючи захисні стіни з утворенням Т- або Г-подібних входів.

Однією із основних проблем під час захисту трансформаторів та іншого чутливого обладнання елементів КІ за першим рівнем захисту є його габарити, що не дають змогу перекрити їх захистом через технологічні обмеження та граничну висоту самого захисту.

В таких випадках рекомендується виконувати підвищену висоту габіонних конструкцій з урахуванням рекомендацій компанії “Hesco” (Велика Британія) та улаштувати додатковий протиосколковий захист (особливо для уразливого обладнання – бака-розширювача масла наверху трансформаторів, ізоляторів та ін.) на верхній частині захисних конструкцій із габіонів, улаштуванням дерев’яних рам та обшивкою із вологостійкої високоміцної фанери або металевих рамок із металевими, броневидами листами абощо.

3.4. Опис основних конструктивних рішень другого рівня захисту

Якщо першочергові заходи першого рівня є тимчасовими (огороження елементів ОКІ габіонами, бігбегами тощо), то організаційно-конструктивні заходи для другого і третього рівня мають тривалий характер як за строком реалізації, так і за терміном прогнозного використання, капітальністю побудови.

Другий рівень за концепцією “Країна-фортеця” – це інженерний захист існуючих елементів та устаткування ОКІ, які мають витримувати прямі поодинокі влучання БпЛА-камікадзе та БпЛА типу “баражуючий боеприпас”, а також відповідно витримувати дію факторів поодинокого влучання ракети на відстані 15 м від захисного елемента ОКІ (див. вище).

Факторами ураження для ракет і БпЛА є первинні та вторинні осколки і вибухова ударна хвиля, при цьому для БпЛА у разі прямих влучань також додається кінетична дія.

За конструкцією захисні інженерні споруди другого рівня поділяються на такі:

- монолітні залізобетонні;
- збірні залізобетонні;
- металеві;
- комбіновані.

До комбінованих належать споруди із застосуванням сталобетонних, сталезалізобетонних конструкцій тощо. Як правило, дерев’яні, цегляні конструкції не мають достатніх захисних властивостей проти дії факторів ураження ЗПН противника.

Для того, щоби витримувати прямі влучання БпЛА, одним із найефективніших способів є організація захисних споруд типу “Шелтер” за принципом “shell-and-core”, тобто “оболонка-і-ядро” (рис. 3.15).

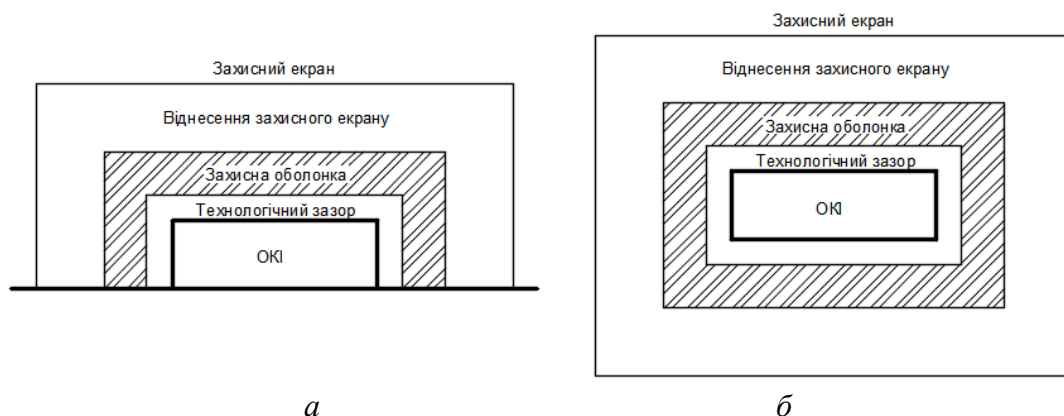
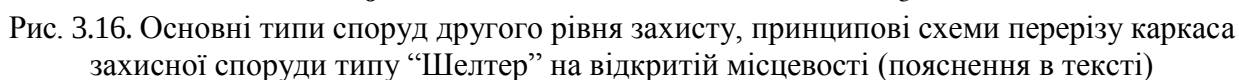


Рис. 3.15. Принципова пропонування схема інженерного захисту ОКІ від прямих влучань БпЛА типу “Shahed”: а – розріз; б – план

При цьому зовнішня “оболонка” виконується у вигляді захисного предетонаційного екрана, який затримує прямі влучання БпЛА. Внутрішня захисна конструкція – “ядро”, яке захищає від ударної хвилі та уламків у разі

Ефективність предетонаційних екранів (як і протикумулятивних решіток) виявляється у здатності руйнувати БпЛА без вибуху за рахунок деструкції крил/фюзеляжу під час зіткнення з ними або ж спричинити спрацювання заряду його БЧ на віднесеній відстані від елемента ОКИ. У дослідженнях дії вибуху на елементи неодноразово було доведено, що найефективнішим заходом убезпечення елементів від дії ВУХ є збільшення безпечної відстані від них до можливої точки детонації [22]. Тому предетонаційні екрани розташовуються на віддалі від захисної оболонки споруди по горизонталі та вертикалі так, щоб створити необхідну безпечну відстань, яка б унеможлиблювала руйнування оболонки від ВУХ або її пробиття уламками і ураження елемента, який захищається.

Для захисту елементів ОКІ завширшки до 20 м пропонується забезпечувати засипанням стін і покрівлі ґрунтом (рис 3.16, а), а захист елементів шириною більше 20 м. забезпечувати спеціальними плитами покрівлі. Для великих прольотів також необхідно встановлювати внутрішні колони.



77

Таблиця 3.1

**Порівняння основних типів споруд другого рівня захисту типу
“Шелтер”**

№	Опис варіантів системи інженерного захисту	Переваги	Недоліки, обмеження
1	Із застосуванням металевих решітчастих рам і засипкою ґрунтом (засипка може бути замінена на 2 ряди фібробетонних збірних панелей або бронелистів)	Швидкість улаштування, надійність, компактність	Значна вартість
2	Із застосуванням сталезалізобетонної оболонки (внутрішній фібро-залізобетонний каркас, зовнішній сталевий решітчастий із предетонаційним екраном)	Компактність, надійність	Складність, тривалість виконання
3	Із застосуванням сталезалізобетонної оболонки (внутрішній стале-фібро-залізобетонний каркас – композитні плити зі сталевими балками, зовнішній предетонаційний екран із канатів)	Нижча вартість, швидкість виконання	Велика площа
4	Із застосуванням тюфяка із фортифікаційного залізобетону з гнучким або жорстким противідколом, розподільча товща із сухого піску, внутрішній стале-фібро-залізобетонний каркас – композитні плити із сталевими балками, зовнішня обсіпка ґрунтом)	Порівняно менша вартість, надійність	Велика площа, складність сполучення устаткування

Сітчасті або ґратчасті сталеві конструкції можуть бути віднесені і окремо від об’єкта, проте їх включення у загальну роботу каркаса дає змогу значно полегшити внутрішнє ядро під час дії ВУХ (рис. 3.17, а).

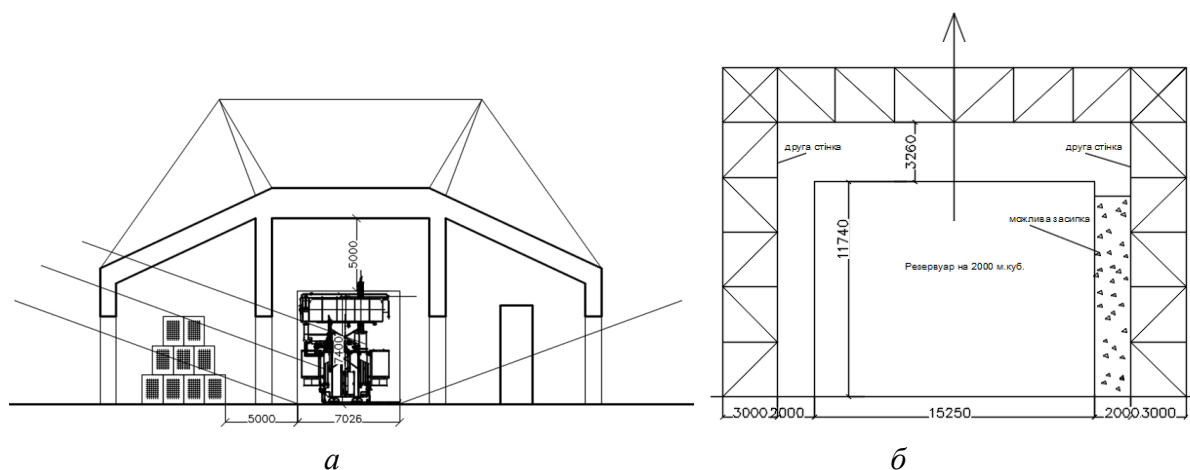


Рис.3.17. Приклади концепцій проєктів захисних конструкцій 2 типу для окремо розташованих елементів: а – для трансформаторів та електроустаткування; б – для резервуарів з улаштуванням подвійної стінки, каркаса з огороженням та засипкою

Як приклад, наведена рекомендована послідовність зведення споруди типу “Шелтер” із захисним предетонаційним екраном із профільним елементами (рис.3.16, а):

1. Розрахунок та розмітка на місцевості для встановлення елементів захисної споруди;

2. Встановлення перших двох рядів колон від споруди;
3. Монтаж металевих листів обшивки на першому і другому рівні колон поярусно;
4. Поярусне засипання ґрунтом простору між листами першого і другого рівня колон;
5. Монтаж сталевих ферм покриття;
6. Монтаж металевих листів підшивки на фермах покриття;
7. Поярусне засипання ґрунтом шару на покрівлі;
8. Встановлення третього ряду колон від споруди (ряд захисного предетонаційного екрана);
9. Монтаж елементів та перемичок екрана.

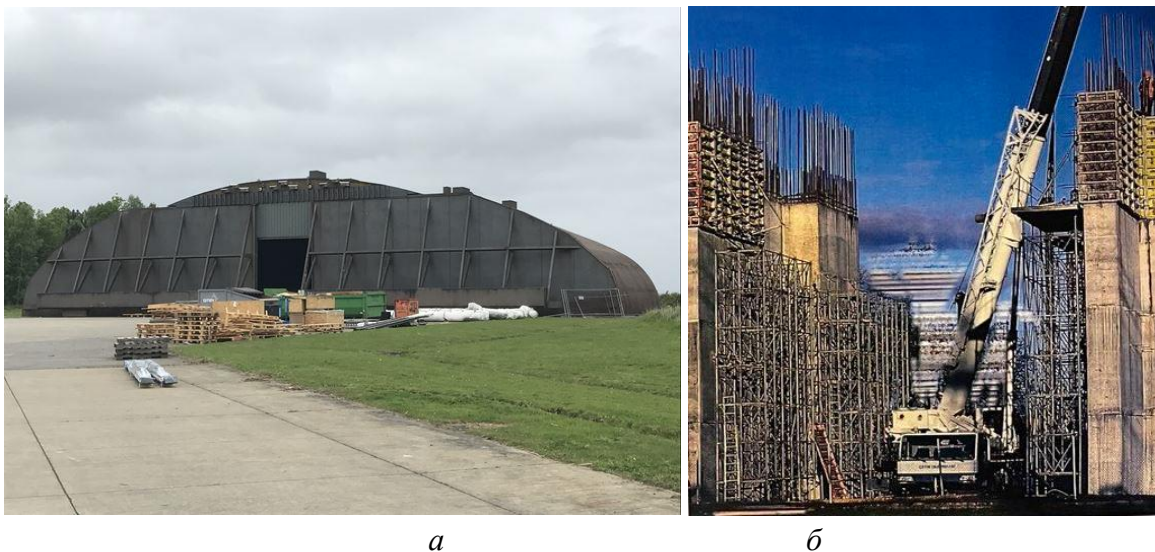


Рис. 3.18. Реалізація захисних споруд другого типу для окремо розташованих елементів: *а* – приклад виконаної споруди у США; *б* – споруда в процесі реалізації в Україні

Конструктивна схема оболонки являє собою решітчасту раму, в якій стіни обшиті по елементах стояків металевими листами на болтах, що дає змогу засипати ґрунт (пісок) або ґрунтоцемент. На покрівлі стелять тільки один лист, підшитий до конструкцій по нижньому поясу, і зверху також засипають ґрунтом. Іншим варіантом замість ґрунту, є улаштування навісних збірних залізобетонних плит зі зміщеними рівнями армування та використанням фібробетону. Захисний решітчастий екран являє собою вертикальну клітину із металевих елементів, яку виносять на відстань не менше 3–4 м попереду споруди.

Для доступу повітря і виходу його згори в покрівлі “Шелтера” можуть улаштовуватися просвіти, які заповнюються частково-проникними екранами, що затримують уламки та послаблюють вибухову хвилю, проте в них може проникати повітря. Можливі трубчасті деталі, димарі та виходи дротів у верхній частині споруди – пропускаються через спеціальні патрубки в покрівлі “Шелтера”. Якщо елемент, який захищається, є джерелом виділення газів, то для убезпечення від їх можливого накопичення можуть бути встановлені додаткові газоаналізатори та улаштована примусова вентиляція

із вибухозахищеними клапанами. За необхідності слід передбачити спонукальну вентиляцію та інше необхідне інженерне та протипожежне обладнання.

Можуть бути застосовані й інші конструкції та споруди із еквівалентним рівнем захисту (рис. 3.17 б, 3.18). “Шелтери” рекомендується улаштовувати при захисті існуючого електрообладнання, яке ремонтують із відключенням (наприклад, трансформатори), та при захисті нового обладнання, яке встановлюють, або обладнання, яким замінюють пошкоджене.

До другого рівня захисту також належать внутрішні захисні споруди елементів ОКІ всередині будівель і споруд за умов недоцільності зведення загального зовнішнього захисту або коли немає фізичної чи технічної можливості його облаштування. Також за належного обґрунтування, або умов, до необхідного рівня захисту можуть бути доведені існуючі споруди шляхом їх підсилення та збільшення живучості. Окрім “shell-and-core” як захист другого рівня можна застосовувати також суцільні залізобетонні та комбіновані конструкції, які обираються за техніко-економічним порівнянням (див. Розділ 6).

Для існуючих будівель і споруд слід насамперед розглядати їх власну несучу спроможність та захищеність від факторів ураження ЗПН і в разі необхідності та доцільності підсилювати її для підвищення опірності дії уламків та ВУХ. Рекомендовано улаштовувати зовнішні решітчасті або вантові споруди як предетонаційні екрани, для чого існуючі будівлі або споруди може бути необхідно підсилити.

Одним зі складних випадків захисту внутрішнього обладнання є турбіни, генератори, пункти управління та інше критичне устаткування споруд машинних залів ТЕС/ТЕЦ тощо. Через значну складність внутрішнього обладнання, обмежений простір і несучу здатність існуючих конструкцій забезпечити їх захист до третього рівня без глобальної перебудови та перенесення устаткування практично неможливо. Проте, як правило, технічна спроможність забезпечити захист другого рівня для внутрішнього обладнання доступна. Зокрема, можливо збільшити стійкість стінового огороження будівель до ураження осколками та ВУХ, використавши існуючі колони у разі їх наявності. При цьому колони беруться у сталеві обойми із включенням їх у спільну роботу. До колон прилаштовують сталеві прогони, до яких кріпляться два шари товстої високоміцної фанери або OSB. Це можливо виконати прикріпленням листів фанери ззовні прогонів. Також листи фанери можуть виконувати роль предетонаційного екрана у разі влучаннях БпЛА.

Збільшити стійкість до ураження осколками та ВУХ внутрішнього обладнання типу генераторів та турбін можливо улаштуванням довкола них захисних сталевих рам на болтових з’єднаннях, які обшивають знімними металевими листами. Призначення таких захисних конструкцій – убезпечити генератори та турбіни від падіння елементів покрівлі або стін, а також від дії

ВУХ та осколків ракет і БпЛА при непрямих влучаннях. Для підтримування рам можна використати, наприклад конструкції технологічних площадок, за необхідності улаштувавши нові ригелі спирання та стійки. При цьому існуючі мостові крани можна використати як вантажопідйомні пристрої під час монтажу конструкцій без зупинки роботи обладнання. У необхідних місцях, де присутні збірні залізобетонні панелі перекриття або покриття над уразливим обладнанням, можливо улаштувати під ними листи із високоміцної фанери або сталі у якості протиосколкового захисту. Іншим рекомендованим рішенням є улаштування підсилюючих металевих балкових клітин під панелями або над ними із металевими листами перекриття або ж підсилення існуючих панелей сталевими конструкціями.

На покрівлі будівель машинних залів, котельних, пунктів керування доцільним є заміняти руберойдні горючі шари на негорючі, більш легкі, з метою уникнення горизонтального поширення вогню у разі можливих займань.

На конструкціях шатра покрівлі будівель і споруд, які складаються із сталевих ферм, пропонується улаштовувати додаткові ферми з прогонами, з'єднавши їх з існуючими головними несучими конструкціями покрівель. Нові ферми із прогонами мають виступати у ролі предетонаційного екрана для БпЛА і значно збільшать несучу здатність та жорсткість існуючого шатра покрівлі (рис. 3.19). Якщо існуюче шатро покрівлі виконане із залізобетонних конструкцій, їх слід підсилити сталевими елементами для улаштування верхнього рівня ферм.

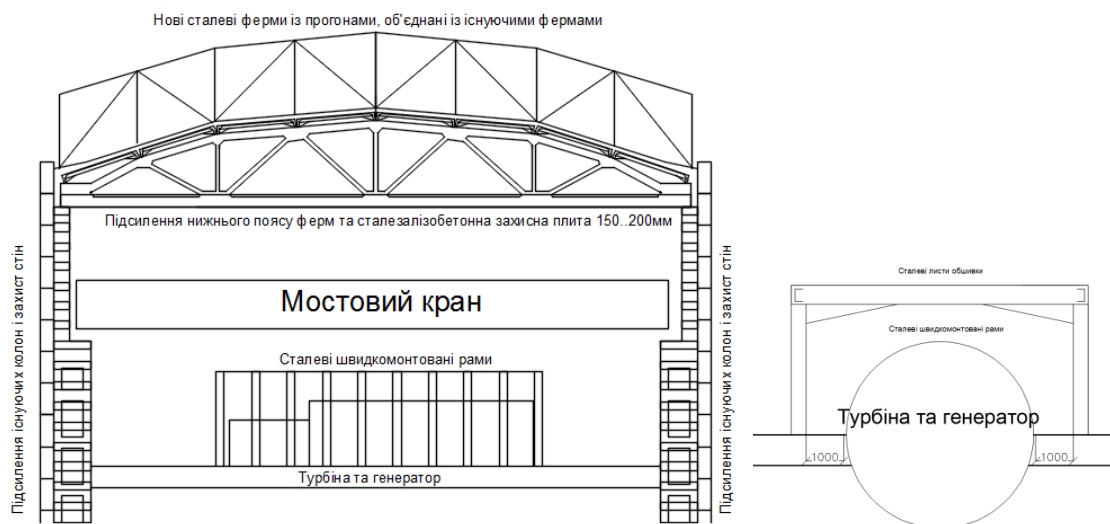


Рис. 3.19. Приклад принципової схеми інженерного захисту будівлі машинного залу ТЕЦ/ТЕС у поздовжньому та поперечному перерізах

На покрівлі будівель великопролітних машинних залів та котлів і подібних їм, які зазвичай складаються із сегментних решітчастих ферм, можливо підсилити нижні пояси сталевими елементами. По нижніх поясах одним із ефективних рішень є встановлення сталевих прогонів і улаштування по них залізобетонної монолітної суцільної композитної плити по

профільованому настилу. Таке рішення значно збільшує структурну зв'язність, жорсткість та живучість шатра покрівлі, а також дає змогу затримувати монолітною плитою осколки та частину ВУХ від БпЛА, а в окремих випадках і від ракет, або/та виконувати роль предетонаційного екрана.

Роботи із улаштування захисту рекомендовано проводити по захватках. Захист пунктів управління рекомендовано улаштувати за допомогою рам підсилення (стійок та ригелів) із металу або деревини, із підшивкою стелі товстостінною високоміцною фанерою або металевими листами. Вікна та слабкі ділянки стін рекомендовано зашивати сталевими бронелистами по металевих рамках не менше 5 мм завтовшки (рис. 3.20).

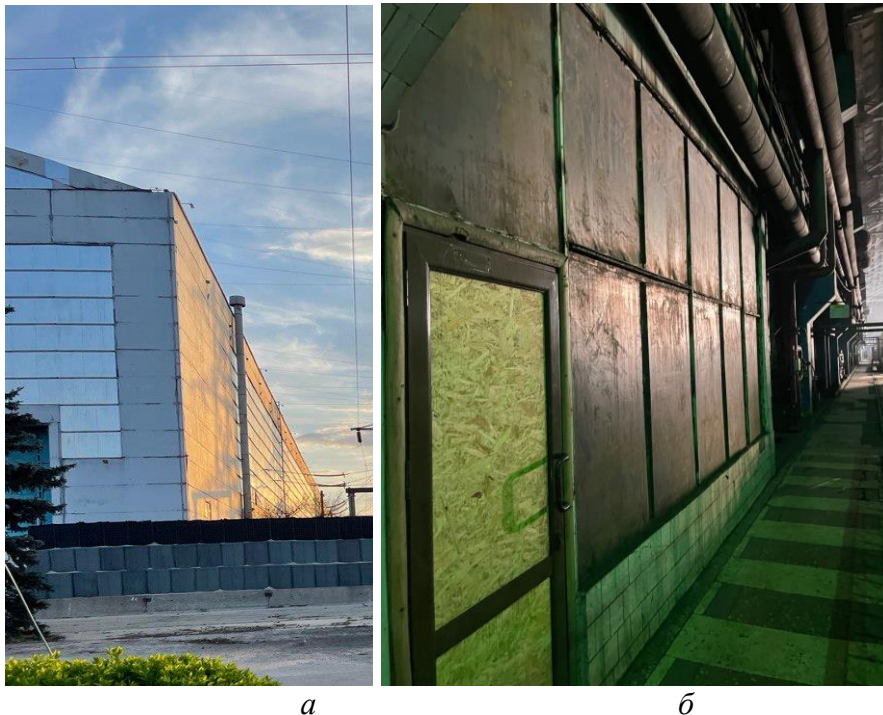


Рис.3.20. Виконані окремі заходи 2 рівня машинного залу ТЕЦ/ТЕС: *а* – зашиття вікон подвійними листами із високоміцної фанери як предетонаційних і протиосколкових екранів; *б* – улаштування сталевих бронелістів навколо пункту управління машинного залу

3.5. Опис основних конструктивних рішень третього рівня захисту

Третій рівень захисту згідно з концепцією “Країна-фортеця” – це підземна урбанізація ключових елементів ОКІ, яка покликана захистити від прямого поодинокого влучання в елемент ОКІ усіх відомих типів БпЛА, крилатих та балістичних ракет противника.

У кожному конкретному випадку мають враховуватися фізико-географічні, гідро-геологічні, кліматичні та інші умови місця зведення захисних споруд. Аналіз результатів проведених досліджень та досвіду побудови системи захисних інженерних споруд у провідних країнах світу дав змогу визначити тенденцію застосування схем їх компонування. Можливі варіанти конструктивного технічного рішення інженерного захисту елементів

ОКІ із заглибленням наведені на рис. 3.21. Згідно зі світової практикою, захисні споруди ОКІ зводяться як на поверхні, так і частково заглиблені (рис. 3.21 б, в).

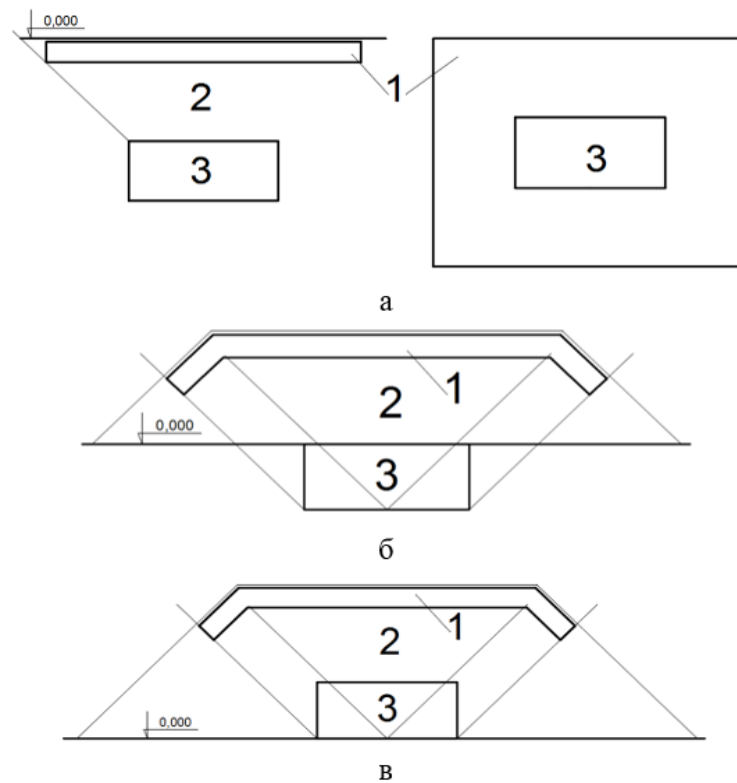


Рис. 3.21. Варіанти конструктивного технічного рішення захисту елементів ОКІ:
 а – з повним заглибленням; б – частковим заглибленням; а, в – на поверхні:
 1 – тюфяк, 2 – розподільча товща ґрунту, 3 – остов захисної споруди ОКІ

За способом зведення, третій рівень інженерного захисту елементів ОКІ може бути облаштований:

- у існуючих спорудах;
- з частковим дооблаштуванням (реконструкцією);
- у нових спорудах.

Щодо взаємодії з існуючою або новою забудовою, яка є другорядною, або не належить до елемента ОКІ, споруди третього рівня захисту можуть бути:

- повністю інтегровані у контур плями забудови існуючих або нових споруд;
- частково інтегровані у контур плями забудови існуючих або нових споруд;
- окремо розташовані.

Порівняння ефективності основних типів споруд третього рівня захисту наведено у табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Порівняння основних типів споруд третього рівня захисту

№	Опис варіантів системи інженерного захисту	Переваги	Недоліки, обмеження
1	Підземне занурення елементу ОКІ	Найбільший ступінь захисту, маскування, економія надземної площі	Значна вартість, складність експлуатації, урахування гідрогеології
2	Часткове заглиблення	Баланс вартості і строків виконання, можливість використання рельєфу	Необхідність маскування, часто необхідна посилена гідроізоляція та дренаж
3	На поверхні із обсіпкою	Порівняно менші вартість, швидкість улаштування, полегшена експлуатація	Зменшений ступінь захисту, дуже складно приховати, вилучення надземної площі

За конструктивно-будівельними прийомами для занурення споруд можуть бути застосовані такі заходи (рис. 3.22):

- а) викопування вертикальних котлованів;
- б) перекриття ущелин, яруг тощо;
- в) використання скельних навісів;
- г) підрізання схилів;
- д) улаштування горизонтальних печер та штолень;
- е) використання і адаптація існуючих підземних просторів (шахт, печер тощо).

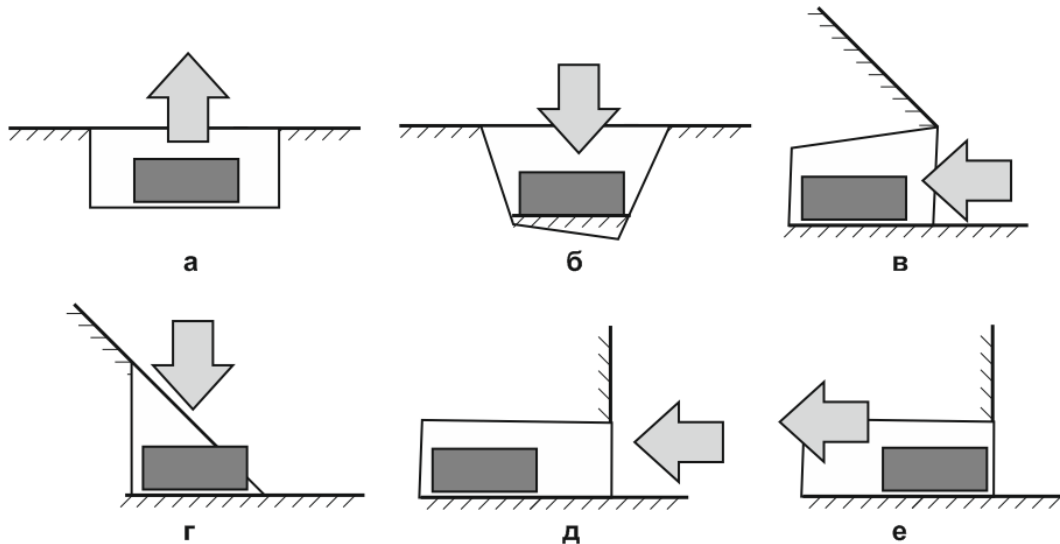


Рис.3.22. Основні схеми улаштування захисних конструкцій третього рівня (пояснення див. у тексті)

Тип споруди також може бути пов'язаний із її функціоналом, що і утворює комплекс підземної урбанізації (рис. 3.23).

Приклад зовнішнього і внутрішнього вигляду побудованих захисних споруд третього рівня для інфраструктури показаний на рис. 3.24.

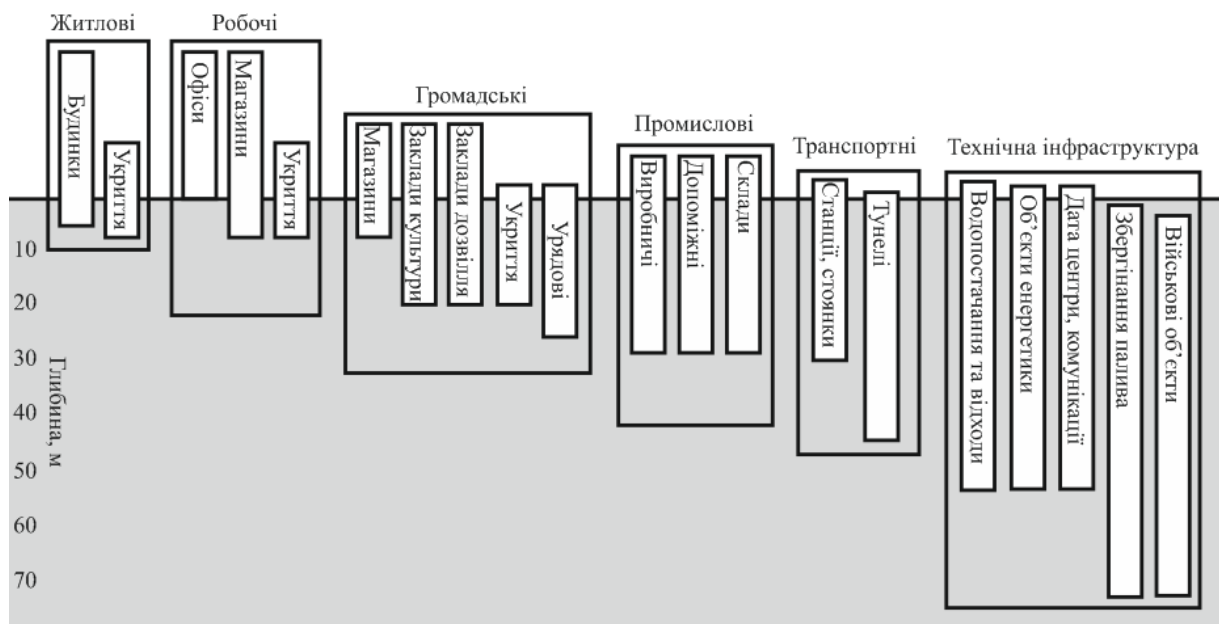


Рис. 3.23. Функціонал підземної урбанізації інфраструктури та можлива середня глибина розташування будівель і споруд

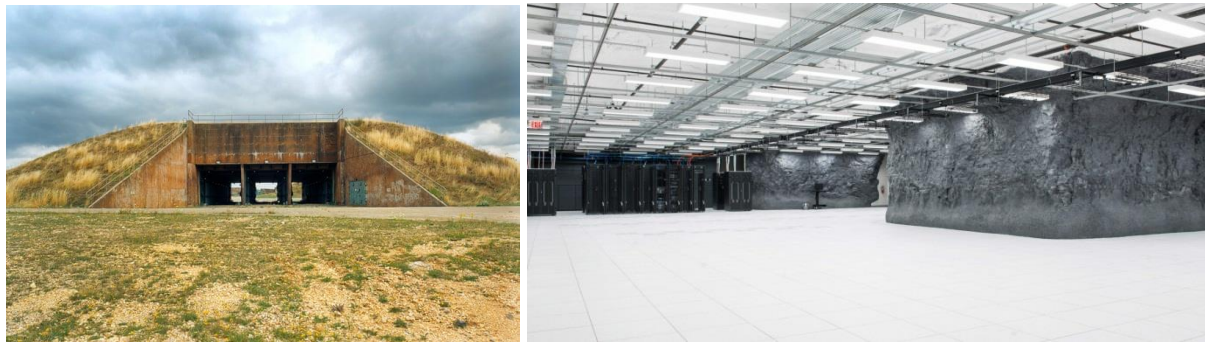


Рис. 3.24. Приклади побудованих захисних конструкцій третього рівня

Рекомендована послідовність виконання робіт для поверхневого розташування споруди ОКІ (рис. 3.20, в) може бути такою:

1. Підготовчі роботи, вирівнювання ділянки, улаштування котловану під фундаменти;
2. Улаштування фундаментів під остов та захисну оболонку споруди (т.зв. “тюфяк”), прокладання підземних каналів для комунікацій;
3. Улаштування закритого остову основної споруди;
4. Заведення незнімного обладнання, улаштування виводів;
5. Влаштування частини тюфяка на висоту остову споруди;
6. Засипання піском простору між тюфяком та остовом, насипання розподільчої товщі;
7. Улаштування по захваткам верхньої частини захисного тюфяка споруди;
8. Улаштування обсіпки.

Станом на час написання цієї книги йде реалізація першого, визначеного урядом переліку об’єктів третього рівня захисту (рис. 3.25–26).



Рис. 3.25. Візуалізація захисних інженерних споруд третього рівня в Україні згідно з концепцією “Країна-фортеця”



Рис. 3.26. Процес реалізації захисних конструкцій третього типу в Україні в середині 2023 року

Безперечно, заглиблення споруд і їх елементів з погляду конструктивного облаштування потребує значних початкових ресурсів і часу. Проте ракетні ураження ОКІ несуть незрівнянно більші втрати для національної економіки та безпеки. У кожному випадку мають окремо

ухвалюватися відповідні організаційно-технологічні та конструктивні рішення щодо способів реалізації проєктів інженерного захисту, враховуючи їх технологічні особливості [25, 9], окремо розроблена робоча проєктно-кошторисна документація, узгоджена із технологами ОКІ, погоджена із усіма зацікавленими сторонами і затверджена у встановленому порядку.

З метою реалізації розробленої концепції інженерного захисту ОКІ “Країна-фортеця” запропоновано три етапи, різні за своєю тривалістю. Рівень захисту, який реалізується за кожним із варіантів за етапами, відповідно до категорії відповідальності елементів ОКІ наведено у табл. 3.4.

Таблиця 3.4
Прогнозні етапи реалізації концепції “Країна-фортеця”

№ п/п	Категорія тривалості реалізації	Рівень захисту для категорій елементів ОКІ		
		А	Б	В
1	Малої тривалості (до одного місяців)	I	I	—
2	Середньої тривалості (до року)	II	I	—
3	Довготривалі (2–5 років)	III	II	I

Результати аналізу отриманого досвіду ураження ОКІ енергетичної галузі України свідчить, що в умовах відсічі широкомасштабної агресії найбільш доцільним є паралельна реалізація всіх трьох етапів для різних об’єктів залежно від їх специфіки. При цьому будь-яка затримка у реалізації інженерних споруд, безперечно, призводить до зниження рівня захисту, а отже, до збільшення імовірності ураження ОКІ енергетичної галузі України.

На першому етапі, із урахуванням часових і фінансових обмежень, найдоцільніше застосувати первинний інженерний захист першого рівня елементів ОКІ електроенергетичної системи та частковий захист ОКІ газотранспортної системи і нафтовидобувної промисловості за другим рівнем. При цьому для новітніх ОКІ енергетичної галузі України доцільно відразу зводити інженерні споруди третього рівня захисту.

Під час улаштування інженерного захисту кожного елемента ОКІ, крім воєнних загроз, мають бути враховані його габарити, технологічні параметри для функціонування та обслуговування, ремонтпридатність, збережуваність та інші компоненти надійності [26].

Для специфічних, нетипових елементів ОКІ енергетичної галузі (дамб, транспортних галерей, устаткування баштового типу, градирень, газгольдерів тощо) захист слід розробляти індивідуально, з урахуванням їх особливостей.

Глибинний аналіз критичності елементів та можливої пріоритезації цілей противником, його центру тяжіння може допомогти раціонально розподілити ресурси на захист елементів ОКІ із досягненням прийнятного рівня їх захисту.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАГРОЗ ТА ІНЖЕНЕРНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ

У цьому розділі розглянемо натурні та чисельні експерименти ЗПН та їх взаємодії з елементами інженерного захисту ОКІ. Основними **принципами моделювання**, покладеними в основу експериментальних досліджень, є такі:

1. Прийняття відомих параметрів ЗПН на основі наявної інформації щодо них;
2. Визначення невідомих параметрів на основі даних із місць падіння та уражень ЗПН, а також припущень щодо загальних компонувальних принципів та аналогій;
3. Встановлення параметрів елементів ЗПН на основі натурних випробувань реальних зразків;
4. Просторове комп'ютерне моделювання ЗПН та захисних споруд у скінченно-елементних комплексах;
5. Простеження кореляцій із аналітичними методами.

4.1. Експериментальні лабораторні дослідження параметрів безпілотних літальних апаратів

Через відсутність проєктних даних, але маючи в наявності рештки БпЛА “Shahed-136”, встановлення параметрів жорсткості його елементів можливо провести на основі натурних випробувань реальних зразків. Тому з метою визначення реальних фізико-геометричних характеристик несучої обшивки БпЛА “Shahed-136”, проведено розрахунки та натурні випробування деталі обшивки, отриманої з місця ураження у 2022 році. Випробування виконувались у випробувальній лабораторії катедри металевих, дерев'яних і пластмасових конструкцій КНУБА.

Елемент обшивки був вирізаний у формі прямокутної пластинки, розрахункова схема якої прийнята у випробуваннях як шарнірно оперта однопролітна балка, завантажена зосередженим навантаженням P посередині прольоту. Рухомість по вертикалі та зосередженість навантаження забезпечені спеціальною конструкцією випробувальної установки. Проліт балки-плити прийнятий 200 мм, ширина зразка 80 мм. На опорах передбачене додаткове спирання по 20 мм з кожного боку.

Методика випробувань. Випробування виконувались у два етапи. Перший етап випробувань – до утворення деформаційної хвилі у верхній обшивці. При навантаженні $P = 2,750$ кг у балці-плиті утворилася хвиля з локальним відшаруванням верхньої обшивки. Далі навантаження залишалося незмінним і діяло на конструкцію протягом доби для вивчення реологічних властивостей. Так було встановлено зростання прогинів при постійному навантаженні, внаслідок послаблення жорсткості конструкції на 18%

(утворення хвилі і часткового відшарування верхньої обшивки балки-плити). Після цього конструкція була розвантажена, залишкові прогини становили при цьому 1,15 мм. Після розвантаження конструкція знов була навантажена. Ефективна приведена жорсткість конструкції $E_{ef}I_{ef}$ визначалась через значення прогинів f_P шарнірно обпертої балки за умови миттєвої пружинистої роботи балки-плити:

$$f_P = \frac{Pl^3}{48(E_{ef}I_{ef})} \rightarrow (E_{ef}I_{ef}) = \frac{Pl^3}{48f_P}. \quad (4.1)$$



Рис. 4.1. Експериментальна установка до навантаження з початковими показниками датчика годинникового типу

Зведені результати випробувань показані у табл. 4.1. та проілюстровані на рис. 4.1.–4.3.



Рис. 4.2. Навантаження 2,35 кг на початок утворення хвилі у верхній стиснутій обшивці зразка – а; перший етап навантаження 2,75 кг – утворення хвилі у верхній стиснутій обшивці, діагональний характер відшарування верхньої обшивки – б; зростання прогинів після доби витримування під навантаженням – в

Таблиця 4.1
Результати випробувань

P		Показники датчика		Прогин f_P	Проліт	Згинальний момент Mx	Момент інерції балки-плити I_x	$E_{ef} I_{ef}$	Напруження
Вага, кг	Ньютон	мм	мм	мм	мм	Н·мм	мм ⁴	Н·мм ²	Н/мм ² , МПа
Перший етап експерименту									
0,4	3,924	3,35	2,9	0,45	200	1453333,33	924,053	1572,781	0,2123
0,8	7,848	3,67	2,9	0,77	200	1698701,3	924,053	1838,316	0,4247
2,35	23,054	5,43	2,9	2,53	200	1518675,9	924,053	1643,494	1,2474
2,55	25,016	6	2,9	3,1	200	1344919,36	924,053	1455,457	1,3536
2,75	26,978	6,68	2,9	3,78	200	1189484,13	924,053	1287,247	1,4597
2,75	26,978	7,92	2,9	5,02	200	895667,33	924,053	969,2813	1,4597
Розвантаження									
2,35	23,054	6,43	2,9	3,53	200	1088456,1	925,053	1176,642	1,2461
0	0	4,05	2,9	1,15	200	0	925,053	0	0,0000
Другий етап експерименту									
1	9,81	5,32	2,9	2,42	200	675619,835	924,053	731,1484	0,5308
2,55	25,016	7,8	2,9	4,9	200	850867,347	924,053	920,7993	1,3536
3,05	29,921	7,9	2,9	5	200	997350	924,053	1079,321	1,6190
3,55	34,826	7,96	2,9	5,06	200	1147084,98	924,053	1241,363	1,8844
4,35	42,674	7,98	2,9	5,08	200	1400049,21	924,053	1515,118	2,3090
5,15	50,522	8	2,9	5,1	200	1651029,41	924,053	1786,726	2,7337
5,95	58,37	8,01	2,9	5,11	200	1903767,12	924,053	2060,236	3,1583
6,45	63,275	8,02	2,9	5,12	200	2059716,8	924,053	2229,003	3,4237
6,85	67,199	8,03	2,9	5,13	200	2183187,14	924,053	2362,621	3,6361



Рис 4.3. Другий етап навантаження зразка. Закритична робота балки-плити

під час навантаження

На рис. 4.4–4.5 показані зведені графіки зростання прогинів та зміни зведеної жорсткості балки-плити досліджуваного зразка.

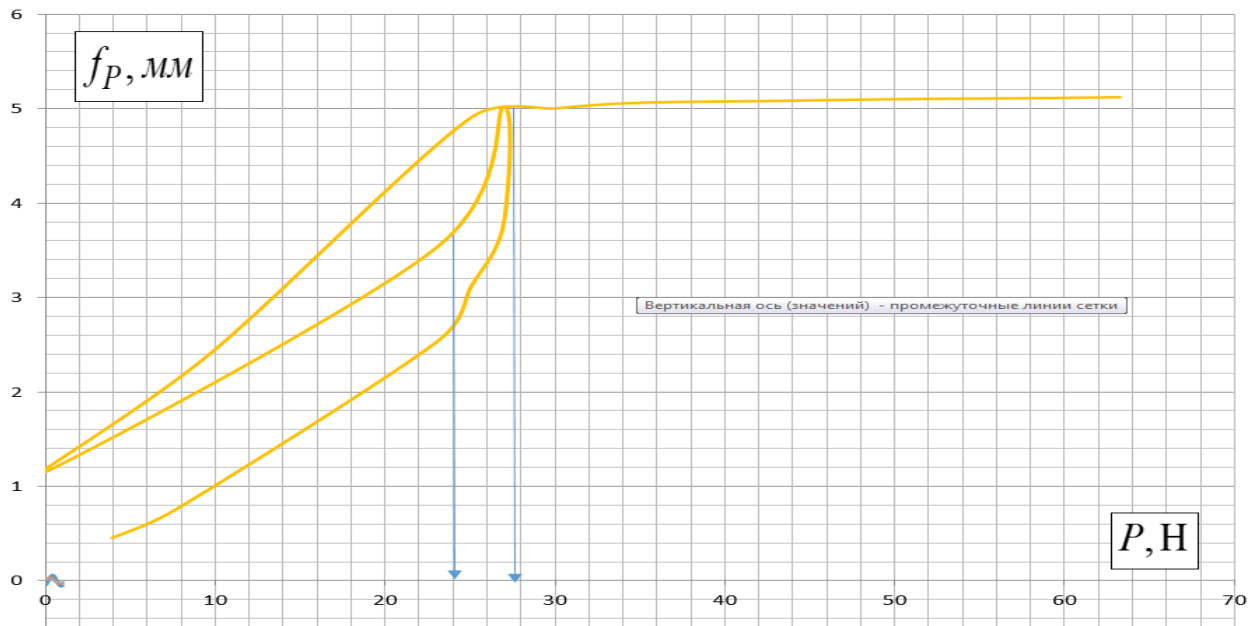


Рис. 4.4. Графік зростання прогинів у балці-плиті

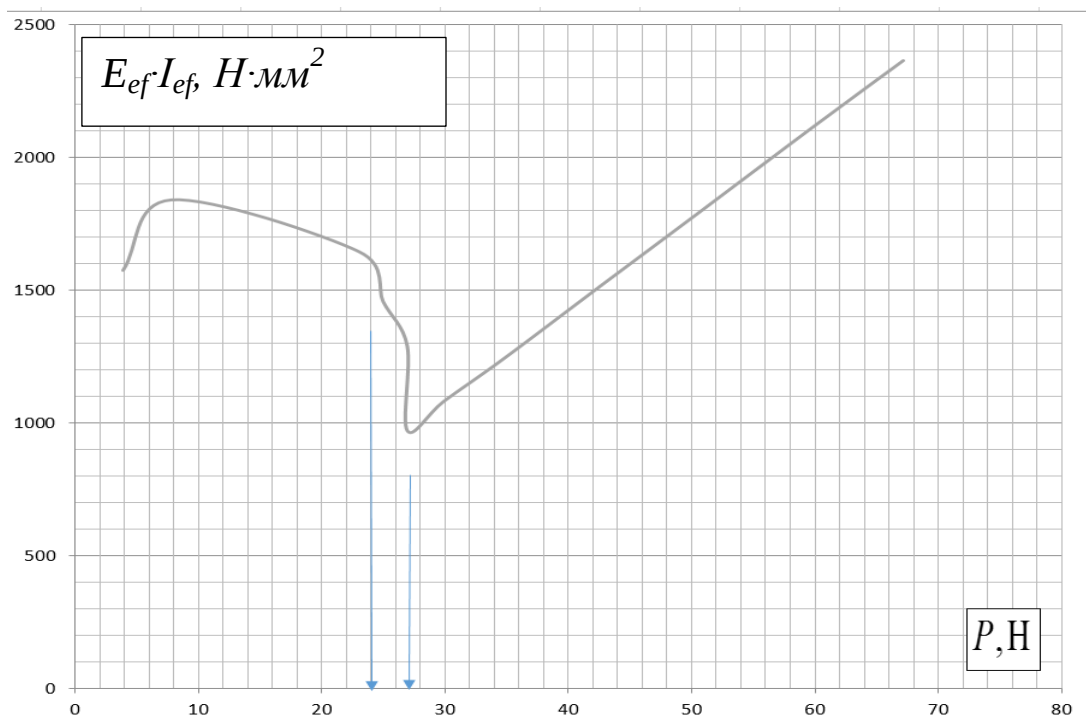


Рис.4.5. Графік зміни приведеної жорсткості балки-плити

Висновок: без урахування закритичної роботи рекомендовано взяти параметри жорсткості пластини $E_{ef}I_{ef}$ як усереднені за результатами першого етапу випробувань: $1461,1 \text{ Н}\cdot\text{мм}^2$.

4.2. Експериментальні чисельні дослідження предетонаційних захисних екранів від влучань БпЛА для споруд другого рівня захисту

Отримавши із попереднього експерименту характеристики жорсткості корпусу БпЛА “Шахід-136”, розглянемо чисельний експеримент із встановлення параметрів предетонаційного екрана, який захищає від прямих поодиноких влучань такого БпЛА у спорудах другого рівня інженерного захисту.

Моделювання було проведене у скінченно-елементному комплексі Ansys LS-Dyna. Суть чисельного експерименту – змодельовати влучання моделі БпЛА “Шахід-136” в системі захисту ОКІ і встановити характер його взаємодії із перешкодою та відгук самої перешкоди. Було проведено динамічний розрахунок з урахуванням руйнування БпЛА. Чисельна модель враховує геометричну нелінійність роботи системи.

Геометрична модель. Крила та основна частина БпЛА “Шахід-136” мають товщину 0,9 мм. Така товщина моделі обумовлена неоднорідністю та несучільністю матеріалу, з якого зроблені крила та основна частина реального БпЛА “Шахід-136”. Товщина одного шару склотканини 0,4 мм. Висота елементів зі стільникового арамідру – 10,6 мм. У смугу шириною 10 мм входить приблизно два вертикальних елементи ребра. Товщина суцільного матеріалу визначена як зведена товщина з умови рівності площі, через те що площа є геометричною характеристикою зсувної жорсткості.

Для першого варіанту предетонаційний екран змодельований у вигляді двох стійок, прийнятих за наближеним теоретичним розрахунком згідно з державними будівельними нормами (далі – ДБН) В.2.6-198 із двотаврів № 33 [1], висотою 3 м і з кроком 1,5 м, розташованих таким чином, щоб згин від удару БпЛА відбувався в площині більшої згинальної жорсткості елементів. Принципова модель з початковим положенням БпЛА показана на рис. 4.6.

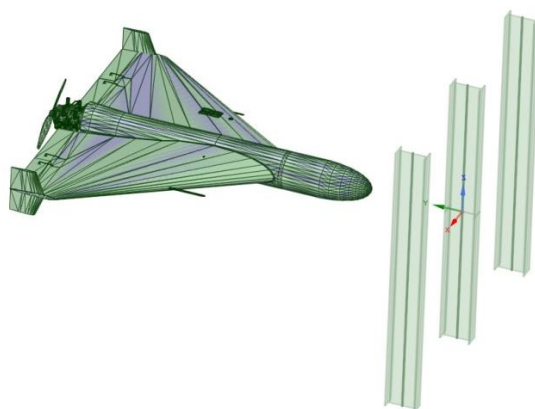


Рис. 4.6. Числова експериментальна модель у скінченно-елементному комплексі Ansys LS-Dyna до початку експерименту

Фізична модель. Матеріал моделі БпЛА має такі характеристики:
– щільність 67 кг/м^3 (визначена як усереднена для склотканини та стільникового арамідру);

- межа текучості 10 МПа;
- межа міцності 30 МПа;
- модуль зсуву 35,24 МПа (визначений за модулем деформацій, що в свою чергу встановлений із експериментальних випробувань).

Модель руйнування була прийнята для матеріалу AL 2024-T4 на основі [2]. Максимальний розмір скінченного елемента прийнято для оптимізації часу розрахунків без втрати прийнятної точності результатів 100 мм. Швидкість БпЛА – 50 м/с. Матеріал стійок системи захисту прийнятий з такими характеристиками:

- густина 7896 кг/м³;
- межа плинності 350 МПа;
- межа міцності 500 МПа;
- модуль зсуву 81800 МПа.

Модель руйнування була прийнята для матеріалу “STEEL 1006” із скінченно-елементного комплексу Ansys LS-Dyna на основі [3]. Обидві стійки за розрахунковою схемою прийняті жорстко закріплені з двох кінців, що модулює щільну конструктивну систему екрана.

Змінні критерії в експерименті. Влучання БпЛА було змодельовано під різним кутом по вертикалі (60°, 45°, 30°, 15°, 0°) та горизонталі (0° і 45°), а також були порівняні механізми руйнування та відстань проникнення БпЛА за межі екрану в напрямку елемента ОКІ, який захищається.

Результати розрахунку наведено ілюстративно на рис. 4.7–4.10 та у табличній формі. В табл. 4.2 показані зображення деформацій та руйнувань БпЛА й системи захисту, описано встановлений характер руйнування, у табл. 4.3 наведено числові показники отриманих результатів.

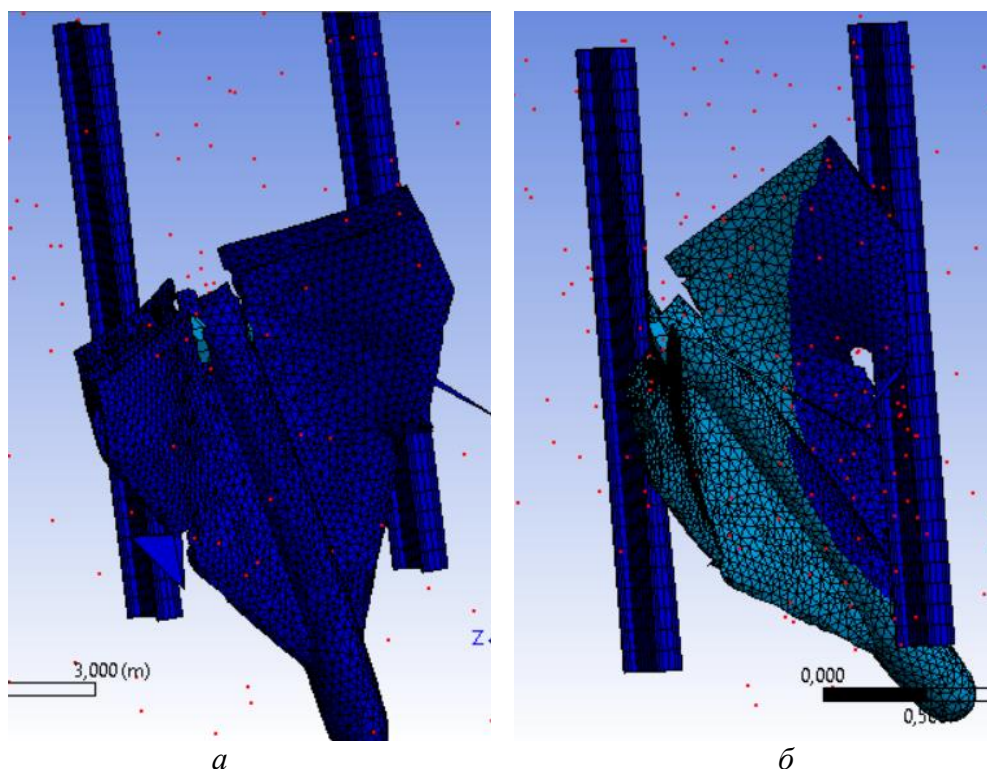


Рис. 4.7. Кінцевий результат руйнування: *а* – кут влучання 60°; *б* – кут влучання 45°

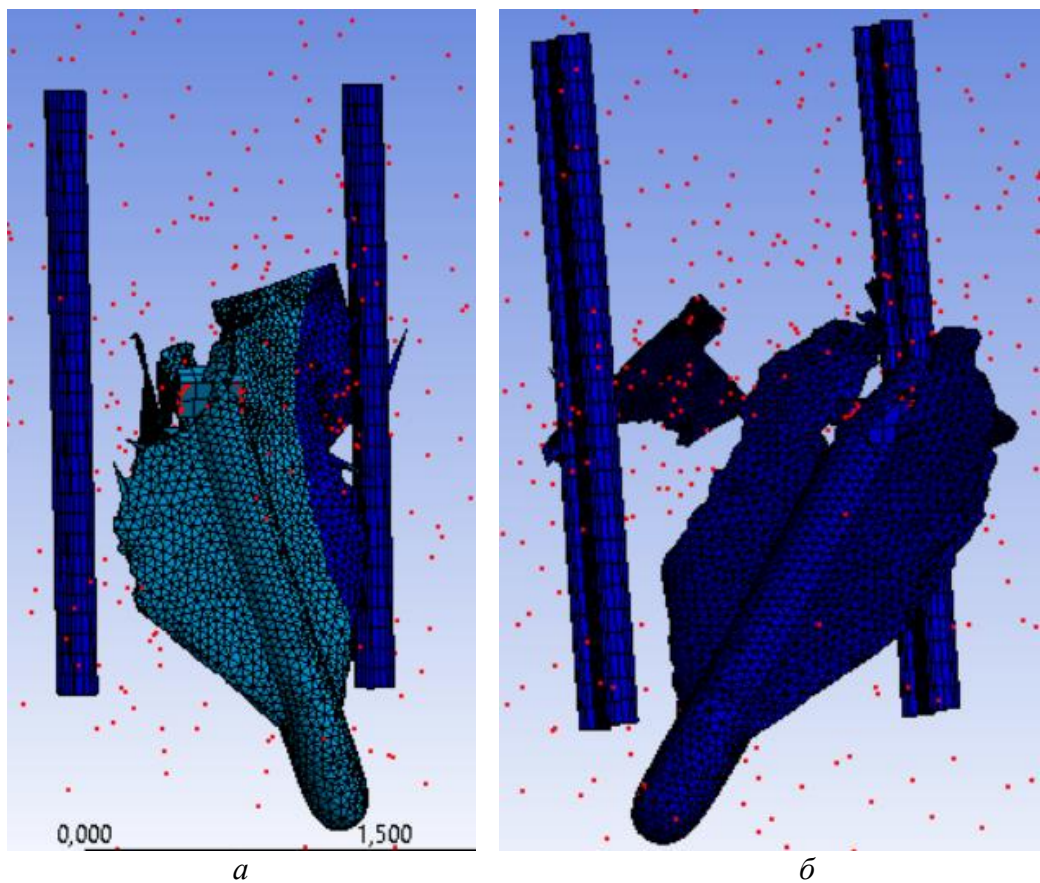


Рис. 4.8. Кінцевий результат руйнування: *a* – кут влучання 30° ; *б* – кут влучання 15°

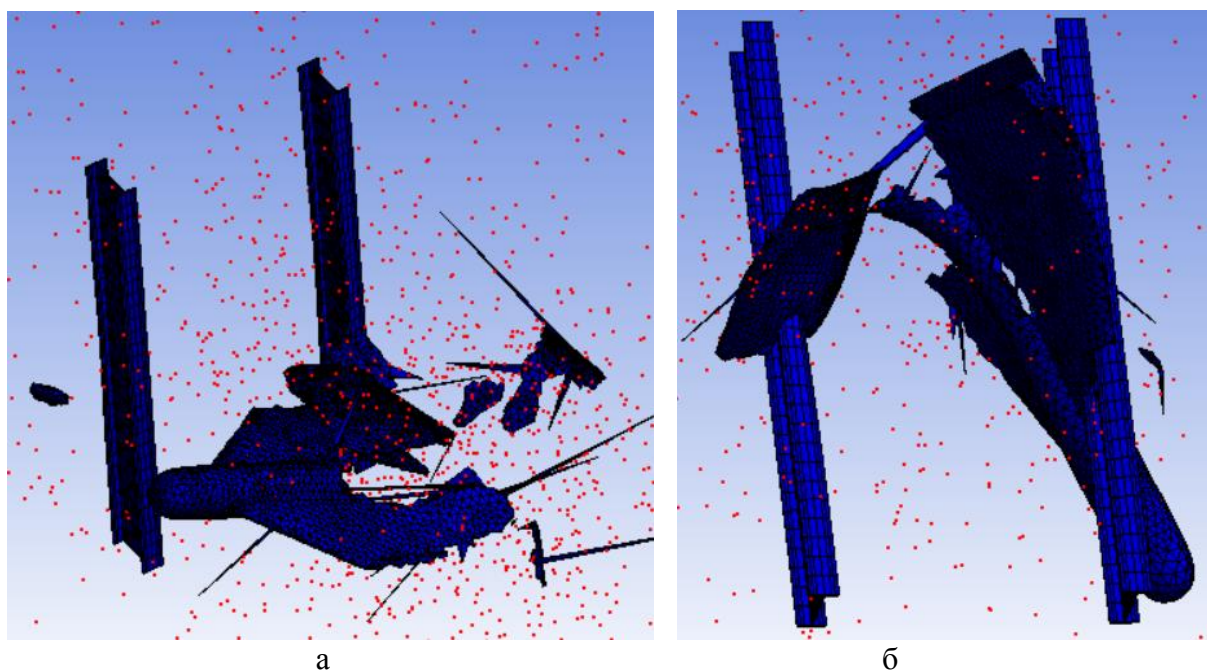


Рис.4.9.Кінцевий результат руйнування: *a* – кут влучання 0° ; *б* – 45° при горизонтальній траєкторії

Таблиця 4.2

**Зведена таблиця результатів чисельного моделювання удару БпЛА у
предетонаційний стержневий екран**

Кут, град	Якісний опис руйнування	Поворот по горизонталі	Поворот по вертикалі	Руйнування крил	Відстань падіння БпЛА за екраном, м
60 по вертикалі (рис. 10 а, б)	Часткове руйнування одного крила, деформація другого та зміщення на пряму польоту по вертикалі вниз. По горизонталі повороту майже не відбувається.	Майже немає	Повертається вниз майже вертикально	Невелике руйнування одного крила	0,5
45 по вертикалі (рис. 11 а, б)	Одне крило починає руйнуватися, друге – лише гнеться. За рахунок цього відбувається горизонтальний поворот на 90 градусів в бік стійки з двотавра. Вертикальний поворот повністю донизу	Орієнтовно 90 градусів	Повертається вниз майже вертикально	Руйнування одного крила	0,75
30 по вертикалі (рис. 12 а, б)	Одне крило майже повністю відривається, друге – частково руйнується та деформується. Незначний горизонтальний поворот відбувається за рахунок нерівномірності руйнування крил. Дрон повертається вертикально вниз	Незначний	Частково повертається вниз	Одне крило майже відривається, друге частково руйнується	1,25
15 по вертикалі (рис. 13 а, б)	Обидва крила відриваються. Дрон повертається вертикально донизу та горизонтально в бік стійки з двотавра	Менше 90 градусів	Частково повертається вниз	Обидва крила відриваються	2,0
0 по вертикалі (рис. 14 а, б)	Крила повністю руйнуються та дрон повертається на 90 градусів по горизонталі. Вертикальний поворот відбувається не вниз, а вгору	Орієнтовно 90 градусів	Частково повертається вгору	Обидва крила відриваються	2,0
0 по вертикалі 45 горизонта льно (рис. 15 а, б)	Одне крило відламується, а дрон повертається вертикально донизу та горизонтально в бік стійки з двотавра	Орієнтовно 90 градусів	Повертається вниз майже вертикально	Одне крило майже відривається, друге частково руйнується	0,75

Встановлено, що стійки екрану від удару БпЛА не руйнуються, а лише деформуються, відбувається локальний згин звису переднього поясу двотавра. Максимальна величина прогину становить 66 мм для кута влучання 15° по вертикалі, а для випадку кута влучання 0° по вертикалі становить – 22 мм (рис. 4.10).

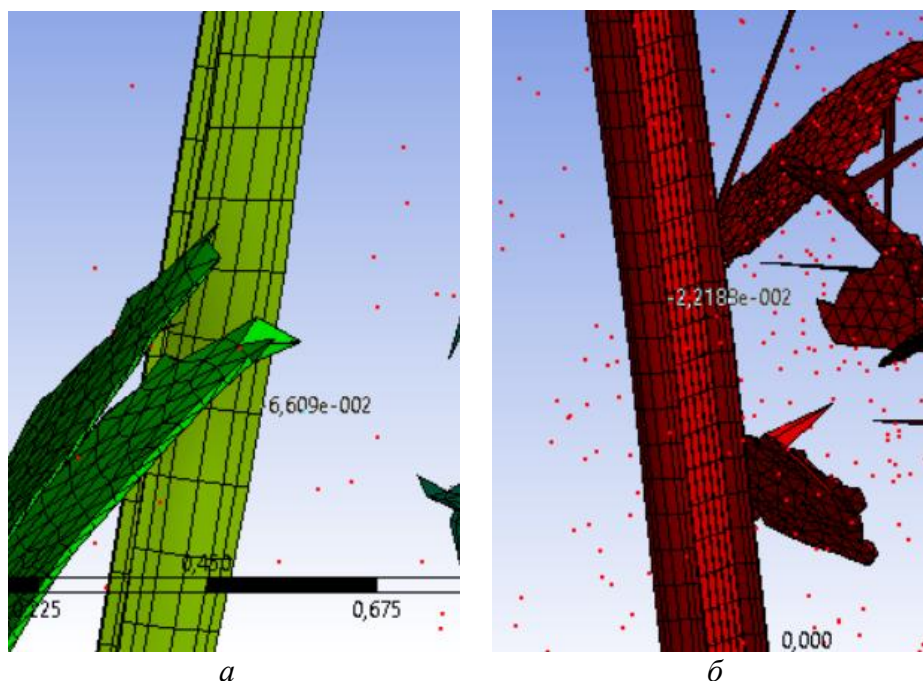


Рис. 4.10. Порівняння деформацій стійки системи захисту: *a* – 15° по вертикалі, 0° по горизонталі; *б* – 0° по вертикалі, 0° по горизонталі

Для другого варіанта улаштування конструкції предетонаційного екрана було взято стійки трубчатого перерізу 280x20 мм, який є еквівалентним двотавру № 33 за більшою згинальною жорсткістю.

Розрахунок влучення БпЛА в захисний екран було проведено також з метою визначення найбільш несприятливого кута з точки зору проникнення частини фюзеляжу із БЧ за екраном в напрямку елемента ОКІ, який захищається (руйнування крил при траєкторії рівно посередині між стійками). Кут влучання був прийнятий 15° по вертикалі, та 0° по горизонталі. Результати розрахунку ілюстративно показані на рис. 4.11.

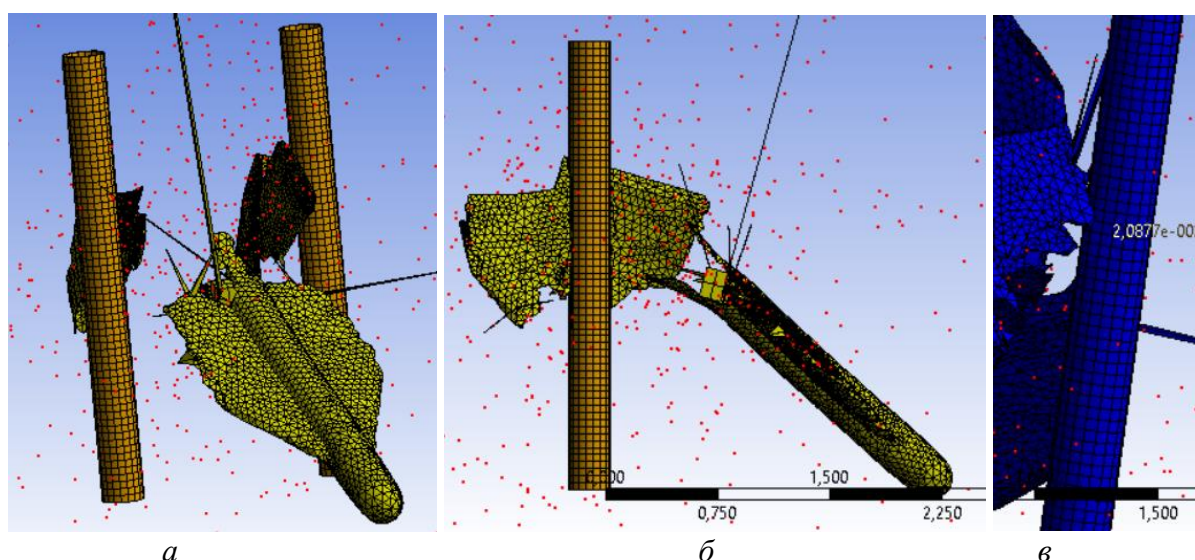


Рис. 4.11. Ілюстрація результатів розрахунку зі стійками із труб еквівалентної жорсткості: *a* – вид спереду; *б* – відстань проникнення за межі системи захисту; *в* – деформації трубчатого перерізу

Як видно з рис. 4.11, відстань проникнення за екран у разі застосування стійок із труб (2,3 м) більша, ніж для перерізів із двотаврів (максимальна відстань 2,0 м), тому двотаври ефективніші для захисних предетонаційних екранів від БпЛА “Шахід-136”. Важливо зазначити, що центральне влучання БпЛА строго між стійками вкрай малоімовірне. Як показало моделювання, під час влучання в екран із двотаврів їх полицки набагато краще за труби сприяють закручуванню БпЛА після влучання, що дає змогу істотно знизити отримані відстані у практичних розрахунках. Деформація у трубчатому перерізі становить 21 мм, що менше, ніж 66 мм в еквівалентному двотавровому перерізі. Отже, можна зробити висновок, що при жорсткішій перешкоді більше руйнуються крила БпЛА, і відстань проникнення за межі системи захисту буде більша. Якщо перешкода більш деформативна, крила БпЛА руйнуються менше, а відстань проникнення за межі екрану більша, через те що перешкода може поглинати енергію удару за рахунок деформацій та ефективніше затримувати БпЛА.

Аналіз результатів і висновки. Найбільш несприятливий кут влучання БпЛА по горизонталі становить 0° , тому що в цьому разі відстань проникнення за екран в напрямку елемента ОКІ найбільша. Проте такий кут малоімовірний, тому що статистика свідчить, що БпЛА типу “Shahed-136” переважно роблять маневр “гірка” для максимального кута атаки 60° . Мінімальний кут атаки, який був спостережений – 20° . Великий кут влучання ЗПН у вертикальні поверхні значно збільшує імовірність рикошету, що встановлено в результаті експериментів та реальної статистики.

Найбільш несприятливим кутом влучання по вертикалі – визначено 15° . Двотавровий переріз є більш ефективним для захисту від БпЛА, ніж трубчатий – еквівалентний за згинальною жорсткістю. Із сортаменту двотаврів найефективніші колонні, в яких довгий та деформативний звис передньої полиці. Також пропонується використовувати двотаври, в яких звис передньої полиці більший, ніж висота стінки. У цьому разі за великих деформацій може включатися в роботу і звис другого поясу.

У даному чисельному експерименті розглянуто моделювання тільки удару БпЛА у предетонаційний екран. В подальшому доцільно розглянути моделювання вибухового навантаження на споруди другого рівня захисту. Безперечно, характер і механіка пошкоджень елементів захисту ОКІ залежить від принципу ініціації заряду та типу БЧ, що становить окремий напрямок для пошуків і моделювання.

4.3. Експериментальні чисельні дослідження параметрів ракетних загроз для споруд третього рівня захисту

Для визначення напружено-деформованого стану захисних конструкцій проведено **чисельний експеримент** із проникнення ракети на різні глибини у залізобетонну товщу верхньої захисної конструкції тюфяка. Параметри захисних конструкцій визначено за аналітичними залежностями (див. розділ 5). Загальний вид розрахункової моделі на різні глибини у залізобетонну

товщу верхньої захисної конструкції тюфяка у разі проникнення ракети показано на рис. 4.12 – 4.13.

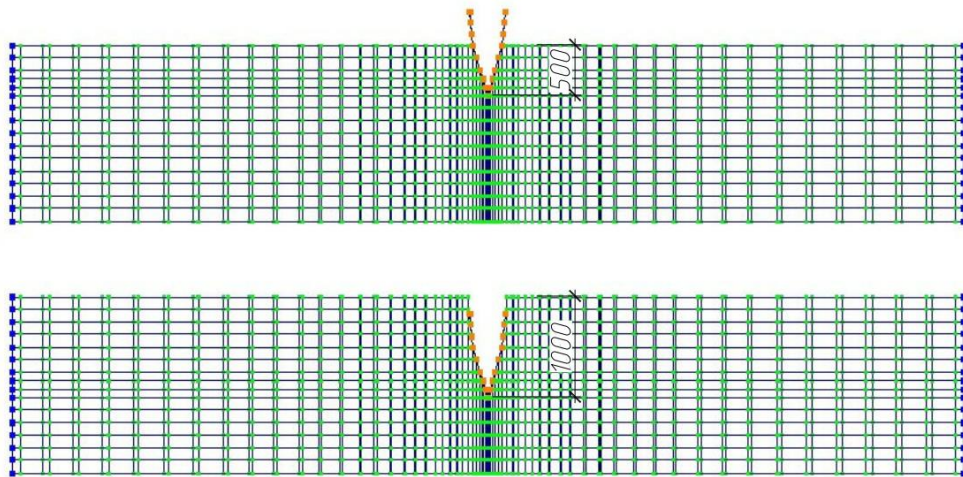


Рис. 4.12. Загальний вид розрахункової моделі у разі проникання ракети на різні глибини у верхню захисну залізобетонну конструкцію тюфяка

При цьому тюфяк змодельовано у складі всієї споруди рис. 4.13. Моделювання проведено у скінченно-елементному розрахунковому комплексі “ЛІРА-САПР”. Для моделі споруди був прийнятий бетон В50, арматура А500С. Глибина механічного проникнення ракети у тюфяк без вибуху визначена попередньо близько 500 мм. За аналітичними підрахунками (див. розділ 5), еквівалентне квазістатичне ударне значення навантаження у разі потрапляння ракети з проникною БЧ в тюфяк становить 2400..2500 т. Для цього розрахунку взято оцінку 2500 т.

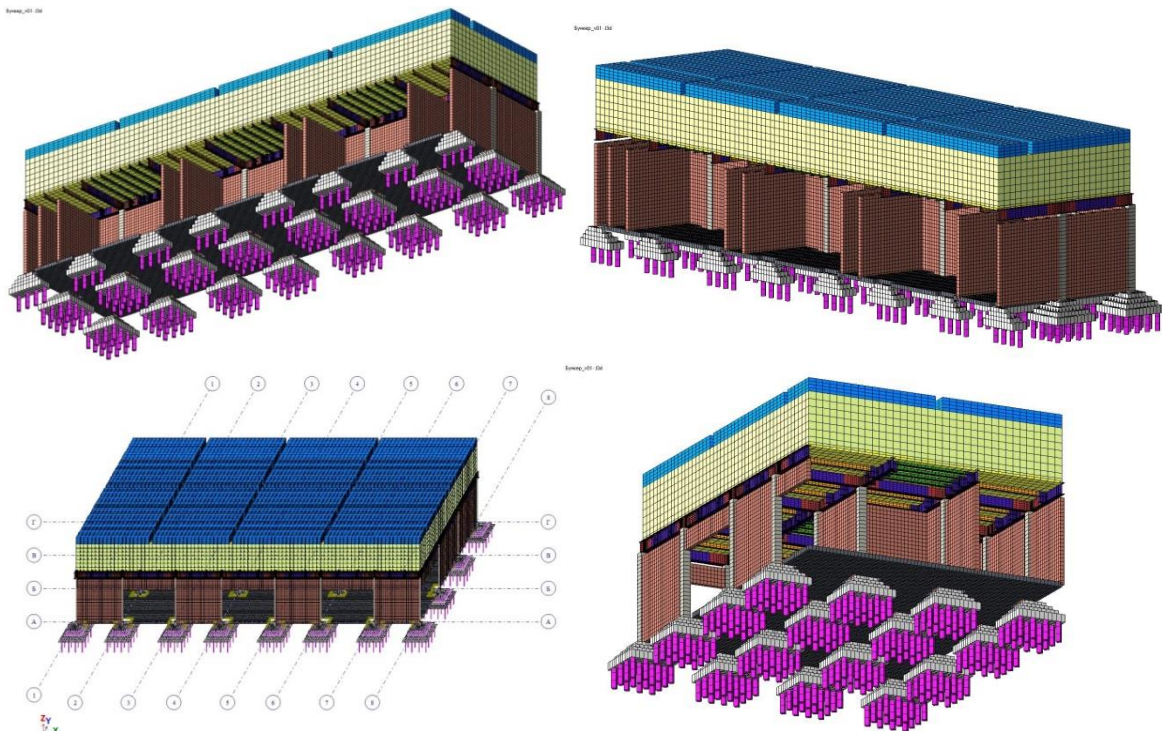


Рис. 4.13. Загальний вид розрахункової моделі всієї захисної споруди у скінченно-елементному розрахунковому комплексі “ЛІРА-САПР”

Результати розрахунку залізобетонної конструкції тують такі. Для розгляду обрано три кроки навантажень № 10, № 12 та № 14, інші тут не наводяться. На перших дев'яти кроках виконується поетапне нарощування навантаження від 0 до 1250 тонн. Розрахунок показав, що усі елементи працюють у межах проєктних напружень, тому розгляд нижче починається з кроку № 10 (рис. 4.13 – 4.14).

Крок №10 Сумарне навантаження -1250т

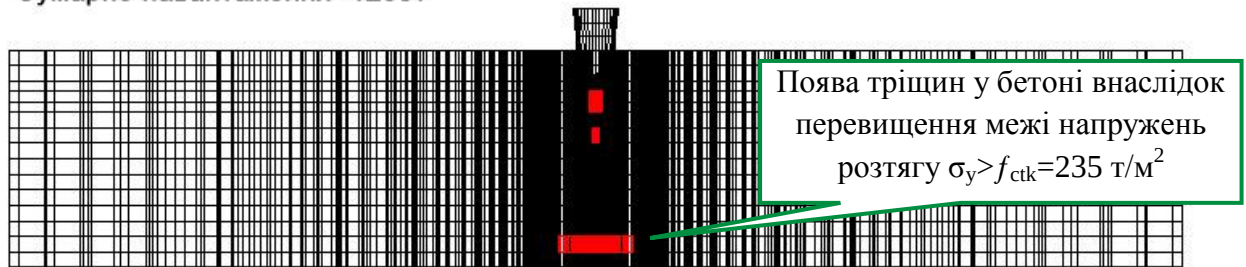


Рис. 4.13. Крок навантаження №10. Сумарне еквівалентне навантаження від удару 1250 т, поява в бетоні перших розтяжних напружень більше міцності бетону на розтяг

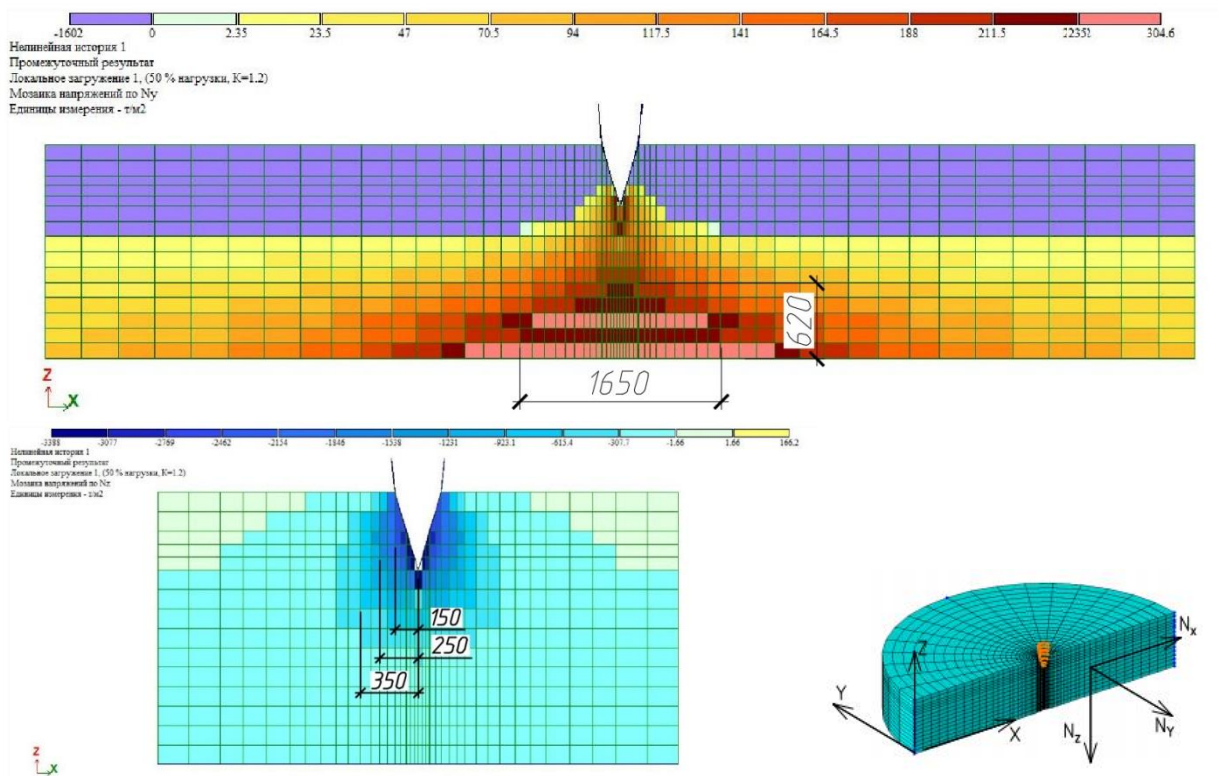


Рис. 4.14. Крок навантаження № 10. Мозаїки напружень σ_y та σ_z . Сумарне еквівалентне навантаження від удару 1250 т, поява в бетоні перших напружень розтягу, які більше міцності бетону на розтяг. Визначення зони стику в бетоні під обтікачем або БЧ ракети та розмірів зони тріщиноутворення внизу залізобетонної плити, загальна прийнята система координат напрямку осей

Результати розрахунку за кроком №15 показані на рис. 4.15 – 4.16, а за кроком №20 – показані на рис. 4.16 – 4.17.

Крок №15 Сумарне навантаження -1875т

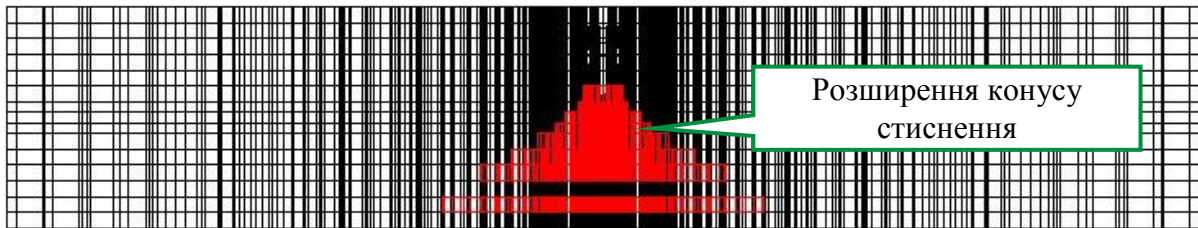


Рис. 4.15. Крок навантаження № 15. Сумарне еквівалентне навантаження від удару 1875 т, утворення конуса граничних розтягувальних напружень бетону під обтікачем або БЧ ракети

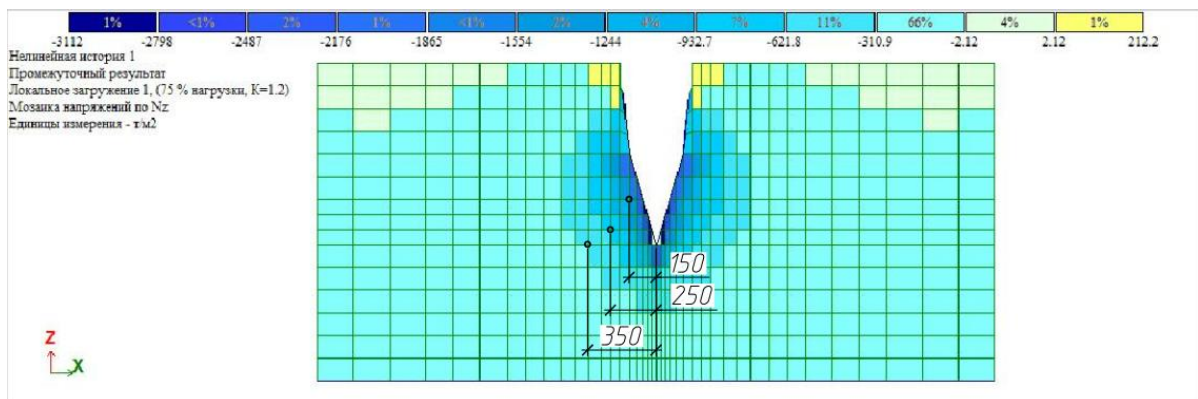
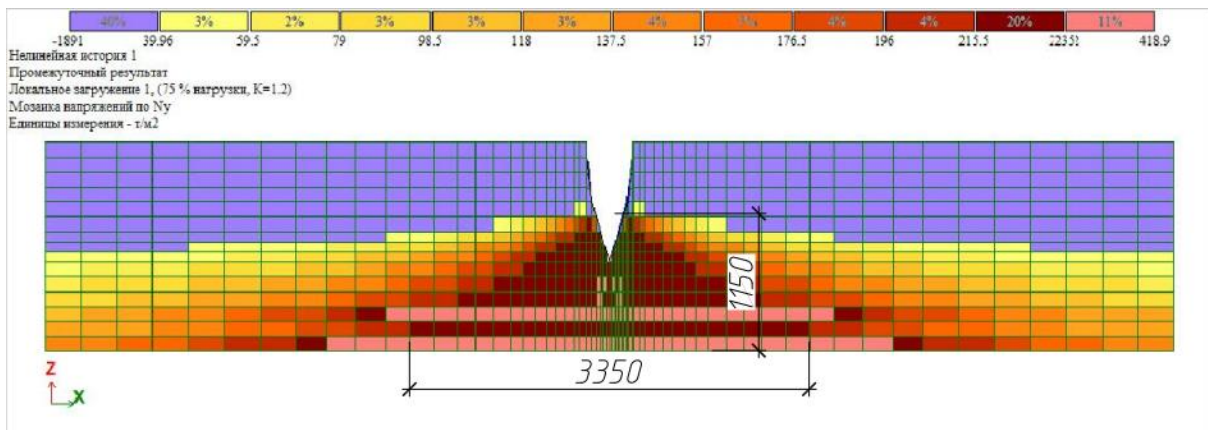
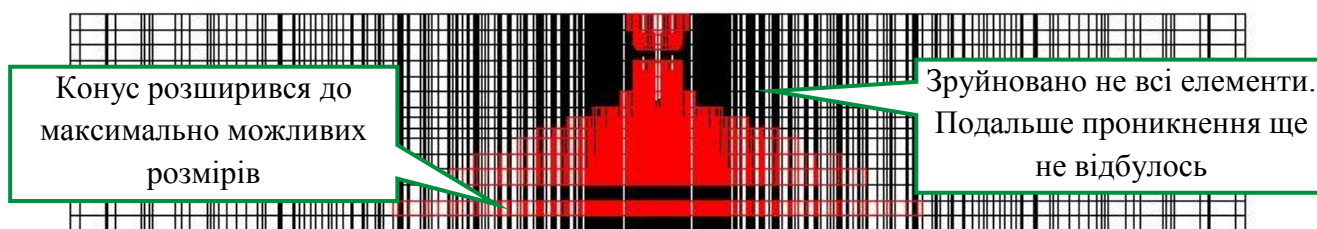


Рис. 4.16. Крок навантаження № 15. Мозаїка напружень σ_y та σ_z . Сумарне еквівалентне навантаження від удару 1875 т. Визначення зони стику в бетоні під обтікачем або БЧ ракети та розмірів зони тріщиноутворення внизу залізобетонної плити

Крок №20 Сумарне навантаження - 2500т



Мозаїки напружень σ_y та σ_z на поточному кроці:

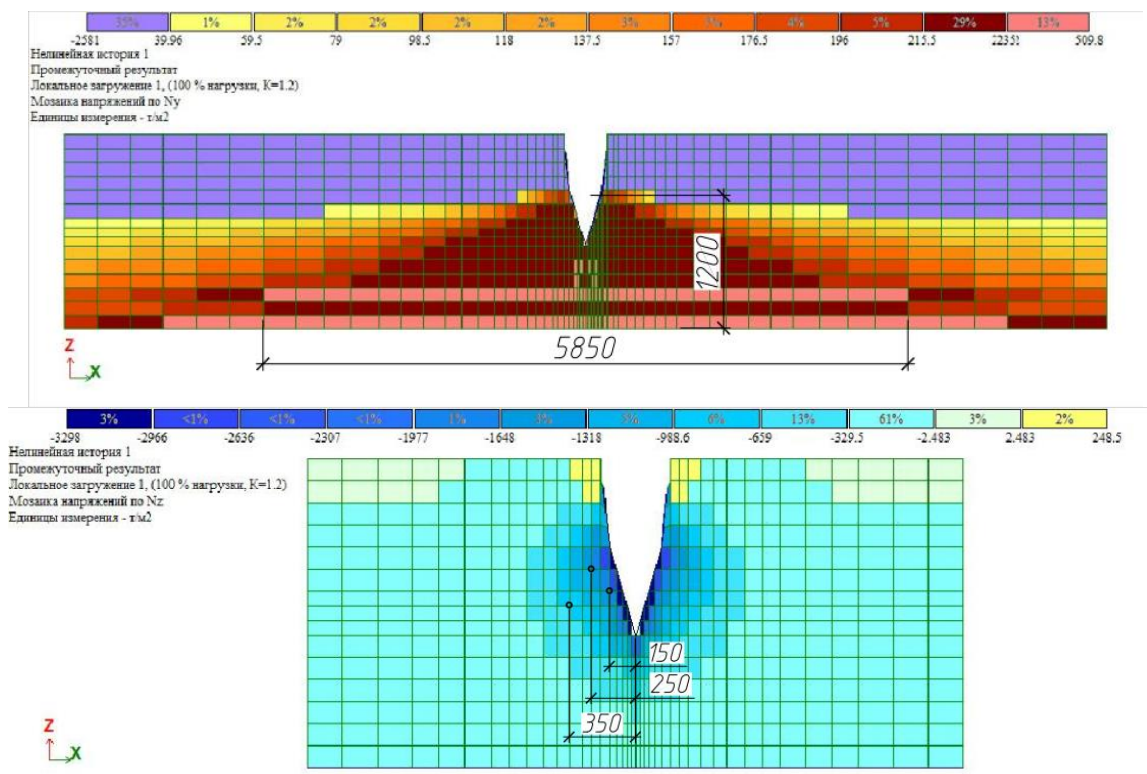


Рис. 4.17. Крок навантаження № 20. Мозаїки напружень σ_y та σ_z . Сумарне еквівалентне квазістатичне навантаження від удару задане 2500 т. Зруйновано не всі елементи. Подальше проникнення ще не відбулось. Визначення зони стику в бетоні під обтікачем або БЧ ракети та розмірів зони тріщиноутворення внизу залізобетонної плити

Зведені дані результатів моделювання наведено у табл. 4.3–4.5.

Таблиця 4.3

Зведена таблиця характеристик стиснутої зони бетону В50 тюфяка

Відстань від епіцентру	Стискаюче напруження, σ_z т/м ²		
	Крок № 10 1250 т	Крок № 15 1875 т	Крок № 20 2500 т
Зона носа ракети	–1815	–2200	–2585
$R=0,15$ м.	–1120	–1990	–2730
$R=0,25$ м.	–750	–1300	–1930
$R=0,35$ м.	–455	–706	–070
$R=0,45$ м.	–330	–510	–730

Таблиця 4.4

Зведена таблиця характеристик розтягнутої зони бетону (армування Ø20 A500C чар. 200x200 мм)

Відстань від епіцентру	Розтягувальне напруження, σ_y т/м ²		
	Крок № 10 1250 т	Крок № 15 1875 т	Крок № 20 2500 т
R=0 м.	318	392	470
R=0,8 м.	266	290	346
R=1,6 м.	210	266	294

Таблиця 4.5

Зведена таблиця переміщень нижньої зони

Відстань від епіцентру	Переміщення, мм		
	Крок № 10 1250 т	Крок № 15 1875 т	Крок № 20 2500 т
R=0 м.	26,2	39,5	53
R=0,8 м.	26	39,2	52,5
R=1,6 м.	25,9	39	52

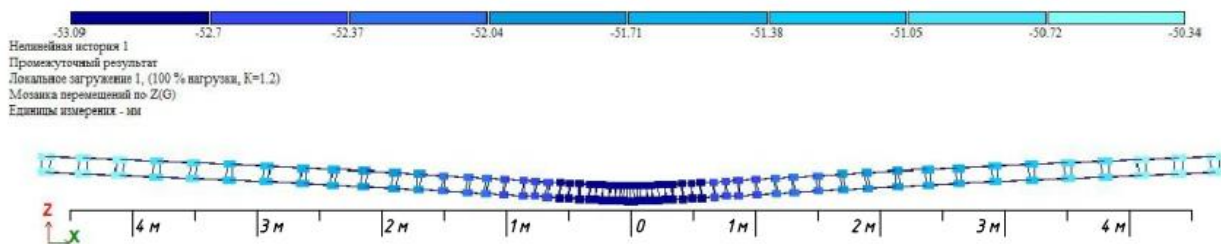


Рис. 4.18. Характерна схема переміщень

Висновки за результатами чисельного експерименту. Оскільки на кінцевому етапі зруйнувались не всі елементи, можна обґрунтовано вважати, що подальшого проникнення ракети у залізобетонний тюфяк не відбувається.

Напруження армованих елементів не досягли критичних, це дає підстави вважати, що за еквівалентного квазістатичного навантаження від удару 2400..2500 т, руйнування арматурних каркасів не відбувається.

Отже, верхня захисна конструкція тюфяка здатна витримати проєктне навантаження удару із певним резервом надійності.

4.4. Експериментальні числові дослідження захисних споруд третього рівня захисту

Для визначення розподілу напружень у спорудах третього рівня інженерного захисту з урахуванням квазістатичного прикладення ударного навантаження від влучання ракети було проведено моделювання чисельного експерименту у скінченно-елементному розрахунковому комплексі SCAD,.

Як геометричні та фізичних параметрів споруди закладено вихідні дані, отримані у розділах 3 і 5. Уточнення даних здійснено на основі проєктної документації стадії “П” від генерального проєктувальника. Оскільки метою

експерименту є отримання якісної картини, побудована плоска скінченно-елементна модель. Розглянуто два випадки прикладення навантаження: посередині споруди та на куті тюфяка. Прикладене аварійне навантаження 2400 т, що відповідає еквівалентному квазістатичному характеристичному навантаженню від удару ракети за консервативним підходом розрахунку (див. розділ 5). Окрім того, враховано всі постійні навантаження від власної ваги конструкцій внутрішнього каркасу остову, розподільчої товщі та тюфяка. Враховано параметри жорсткості каркаса остова, товщі ґрунту та тюфяка на основі попередніх проєктних даних.

Конструктивну схему прийнято за проєктом нерозрізну, сталезалізобетонні ригелі жорстко з'єднуються із залізобетонними або сталобетонними колонами. Графічні результати розрахунків наведено на рис. 4.19 – 4.23.

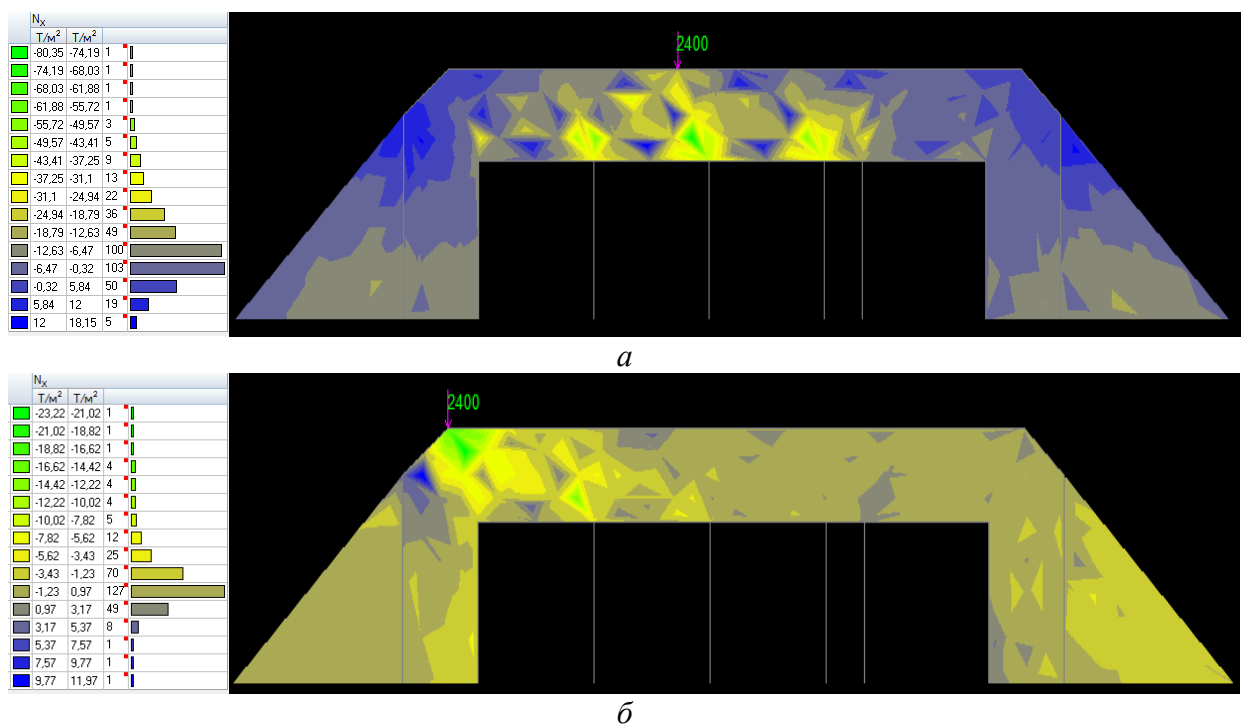
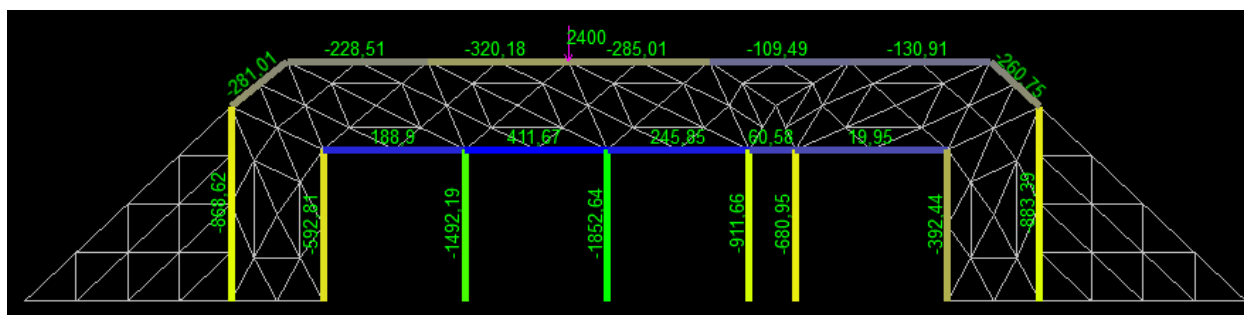
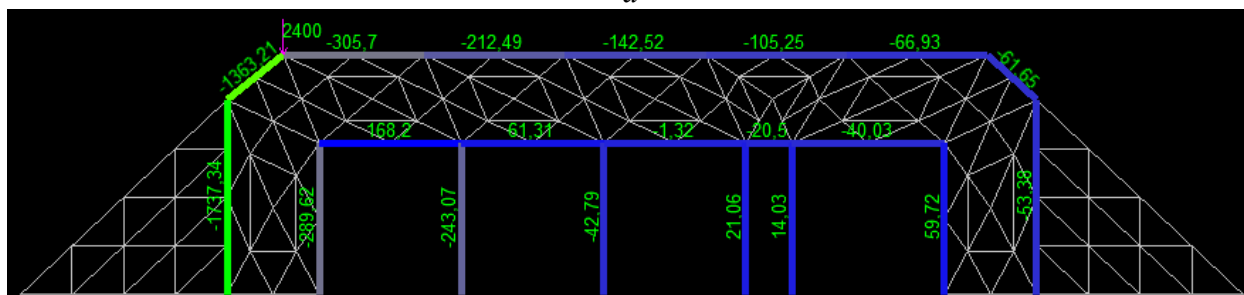


Рис. 4.19. Результати розподілу напружень у споруді за центрального *a* та бічного *б* прикладення ударного навантаження від прямого влучання ракети у тюфяк

Обговорення та висновки. Аналіз отриманих результатів розподілу напружень, розподільча товща ґрунту та залізобетонний тюфяк відіграють істотну роль у перерозподілі напружень, завдяки чому зменшуються моментні зусилля у нерозрізних ригелях і поздовжні зусилля у колонах остову внутрішнього каркасу. Також, товщина і жорсткість розподільчої товщі ґрунту та жорсткість тюфяка дають змогу зменшити горизонтальні та вертикальні переміщення в основній споруді.

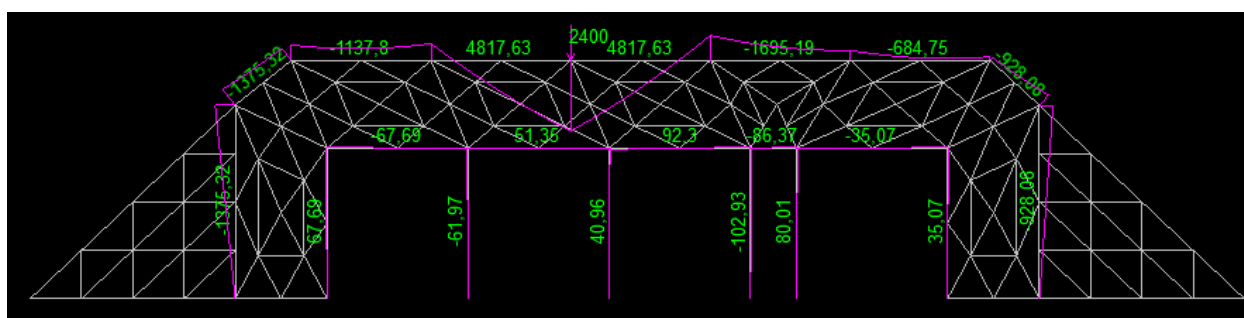


a

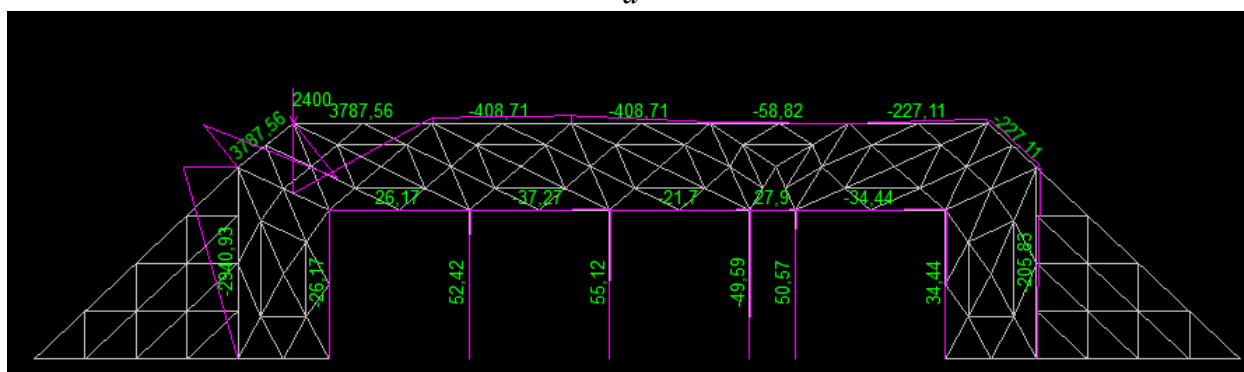


б

Рис. 4.20. Поздовжні зусилля у стержневих елементах за центрального *a* та бічного *б* прикладення ударного навантаження від прямого влучання ракети у тюфяк

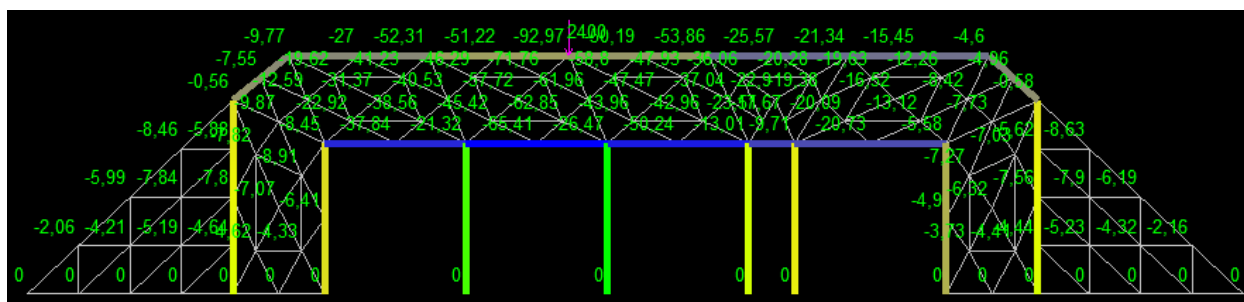


a

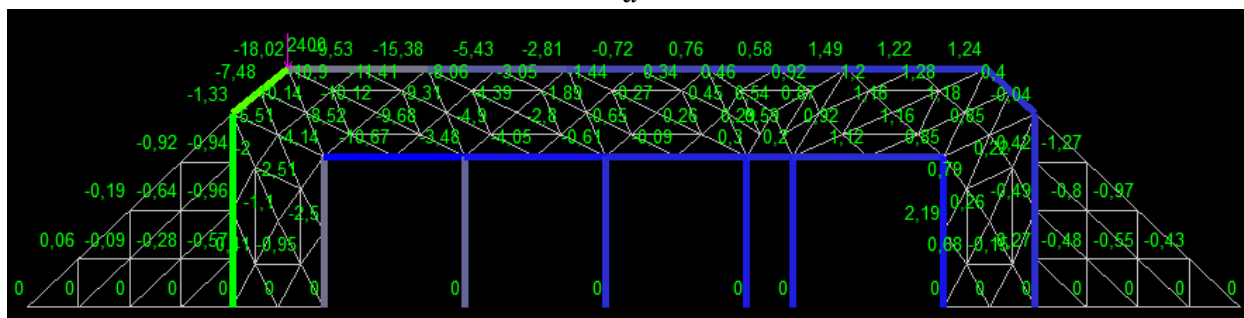


б

Рис. 4.21. Згинальні моменти у стержневих елементах при центральному *a* та бічному *б* прикладанні ударного навантаження від прямого влучання ракети у тюфяк

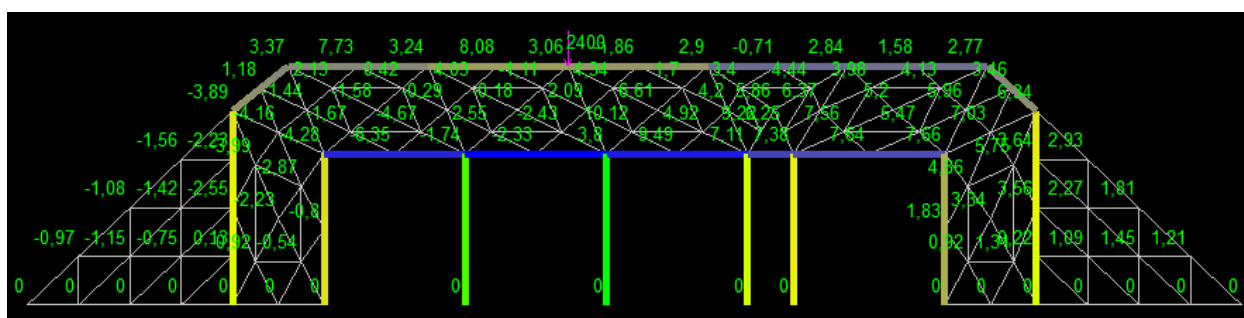


a

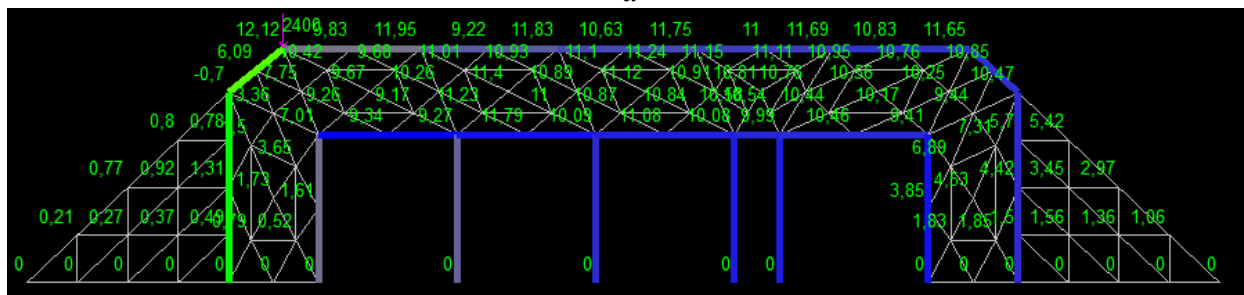


б

Рис. 4.22. Значення вертикальних переміщень у вузлах моделі при центральному *a* та бічному *б* прикладанні аварійного ударного навантаження від прямого влучання ракети у тюфяк



a



б

Рис. 4.23. Значення горизонтальних переміщень у вузлах моделі при центральному *a* та бічному *б* прикладанні ударного навантаження від прямого влучання ракети у тюфяк

Отже, ряд проведених натурних та чисельних експериментів дав змогу уточнити параметри аварійних дій на споруди другого і третього рівня інженерного захисту від факторів ураження ЗПН, а також верифікувати результати аналітичних розрахунків, наведених у розділі 5.

РОЗДІЛ 5. ОСНОВИ ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМ ІНЖЕНЕРНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ ЗА ПРИНЦИПОМ “КРАЇНА-ФОРТЕЦЯ”

5.1. Визначення розрахункових сценаріїв та дій на конструкції захисних споруд

Для розрахунків конструкцій інженерних споруд та їх елементів мають бути призначені класи наслідків споруд та категорії відповідальності конструкцій згідно ДБН В.1.2-14. У переважній більшості випадків ОКІ належатимуть до класу наслідків ССЗ. Розрахунок з урахуванням факторів ураження може вважатися як аварійна розрахункова ситуація.

Загальні дії на інженерні на захисні споруди, які розглядаються у цій роботі, розподіляються на звичайні дії та дії факторів ураження ЗПН. Звичайні дії включають в себе навантаження згідно з ДБН В.1.2-2:

1. Власна вага конструкцій, опоряджувальних шарів, обсіпок тощо. Постійні навантаження завжди присутні в аварійних розрахункових сполученнях;

2. Корисні тимчасові навантаження. В аварійне розрахункове сполучення входить тільки обмежена частина корисних навантажень, які відповідають моменту можливого ураження;

3. Вітрові, ожеледно-вітрові навантаження. Для невисоких споруд, якими в більшості випадків є елементи ОКІ, в аварійних розрахункових сполученнях не включаються;

4. Температурні природні навантаження ураховуються для споруд із відкритими назовні конструкціями. Якщо присутня суцільна ґрунтова обсіпка або/та огорожувальні конструкції, чи є інші аргументи, то температурні навантаження можуть не враховуватися.

Під час підходу до захисних інженерних споруд з точки зору ДБН В.2.2-5 сейсмічні навантаження, ураховуючи навантаження від факторів ураження ЗПН, можуть не розглядатися. Водночас така вимога може стосуватися типу підприємства ОКІ в цілому або це може бути визначено додатково у завданні на проєктування.

Можливі кранові навантаження зазвичай в аварійне розрахункове сполучення не входять, тому що у разі небезпеки всі роботи на кранах припиняються, а вантажі спускаються донизу. Для унеможливлення падіння кранів на елементи ОКІ, під час повітряної тривоги їх слід відводити у безпечну зону стоянки.

Безперечно, окрім аварійних сполучень, захисні інженерні споруди мають витримувати атмосферні та інші вищенаведені навантаження і впливи згідно з ДБН В.1.2-14 [1] та ДБН В.1.2-2 [2] в нормальних умовах експлуатації.

Найнебезпечнішими місцевими факторами ураження ЗПН противника є: ударне навантаження у разі влучання, тиск вибухової ударної хвилі та дія уламків. При цьому береться одночасно тільки один фактор ураження ЗПН.

Аварійними неодноразовими навантаженнями на інженерні споруди є такі.

Від аварійних техногенних і вторинних ситуацій:

1. Температурні пожежні навантаження, живучість при пожежі;
2. Живучість під час аварійних дій;
3. Можливе нерівномірне осідання опор;
4. Баражний ефект згідно з ДБН В.2.2-5 (якщо це регламентовано завданням на проектування та умовами будівництва).

Від дії факторів ураження ЗПН:

1. Ударне навантаження від прямого влучання ракети (з урахуванням різних сценаріїв);
2. Дія ВУХ (квазістатична, динамічна або імпульсна залежно від параметрів ВУХ) на споруду у разі підриву БЧ, при цьому мають бути ураховані різні сценарії;
3. Комбінований тиск на остов згідно з нормами, зокрема ПФ-43 [8], при цьому мають бути ураховані різні сценарії;
4. Еквівалентний квазістатичний тиск 2 кг/см^2 на передню відкриту частину споруди (опція для зведеного урахування непрямих влучань).

Також, якщо це регламентовано завданням на проектування, на споруди враховується дія еквівалентної ВУХ від ядерного віддаленого вибуху за ДБН В.2.2-5.

Можливість ураження елементів споруд стрілецькою, артилерійською та ін. зброєю призначається завданням на проектування відповідно до ДСТУ 4547, ДСТУ 4546 та ДСТУ 8782 та ін.

Квазістатичне, динамічне та імпульсне навантаження є термінами, що використовуються для опису різних типів навантаження, які можуть впливати на споруду під час її експлуатації. Основною різницею між цими типами навантаження є характер часової залежності навантаження та швидкість зміни його величини.

Квазістатичне навантаження – це навантаження, яке змінюється повільно порівняно з часом реакції споруди на нього. Таке навантаження можна вважати постійним протягом тривалого періоду часу.

Динамічне навантаження – це навантаження, яке змінюється з часом, проте зміни відбуваються повільно порівняно з характерним часом власного коливання споруди.

Імпульсне навантаження – це навантаження, яке має короткий час дії, порівняно з часом реакції споруди на це навантаження.

Різниця між квазістатичним, динамічним та імпульсним навантаженням полягає в тому, як швидко вони змінюються з часом та який час реакції має споруда на це навантаження.

Додатково, якщо це не забезпечено організаційно-технічними заходами, на споруди інженерного захисту слід врахувати випадки терактів, диверсій, пожеж, повеней, техногенних аварій, катастроф, ударів транспорту, забруднення небезпечними хімічними речовинами середовищ, біологічного зараження тощо, які можуть становити загрозу для елементів ОКІ. До організаційно-технічних заходів належить унеможливлення прямої дії ударів транспорту на споруди і їх елементи улаштуванням спеціальних болардів, смуг безпеки, перешкод, парканів тощо.

Специфікою перевірок захисних споруд є також проведення особливих розрахунків – компонувальних, із визначення геометрії та матеріалів, розрахунків на проникнення, руйнування від влучання та від дії осколків та ін., які не можуть бути виражені у термінах навантажень за ДБН В.1.2-2.

Як сказано вище, споруди інженерного захисту підлягають розрахункам на прогресуюче руйнування для забезпечення “одиничної живучості”. Концепція “одиничної живучості” передбачає, що у випадку аварійних дій у каркасі споруди допускаються локальні обвалення окремих несучих елементів в межах одного рівня (видалення колони, плити перекриття, балки абощо), але ці початкові обвалення не повинні призводити до обвалення або руйнування конструкцій, на які передається навантаження, що раніше сприймалися елементами, ушкодженими від аварійної дії. Для споруд класу наслідків ССЗ передбачається одинична живучість відповідно до ДБН В.1.2-14, що означає стійкість конструктивної системи до видалення одного (але будь-якого) елемента. Під час розрахунку на живучість конструкцій каркасів захисних споруд слід враховувати:

- перерозподіл зусиль у разі виключення елементів із роботи на інші елементи;
- можливі зміни розрахункових довжин елементів при виключенні із роботи елементів, що примикають до них, і слугують для них розкріпленням;
- можливе падіння елементів каркаса на нижче розташовані конструкції;
- можливі вторинні фактори (падіння огорожувальних конструкцій тощо).

Допускається виключати окремі фактори, що можуть бути причиною прогресуючого руйнування, якщо належним чином виконані конструктивні та інші заходи, наприклад, забезпечені зони безпеки тощо. Розрахунок на прогресуюче руйнування може бути фактором техніко-економічного обґрунтування доцільності будівництва при порівнянні різних варіантів конструктивних схем. Схеми руйнування слід задавати за спеціальними сценаріями (із визначенням зон руйнування, послідовності тощо), які необхідно розробляти з урахуванням особливостей конструктивної схеми та за оцінюванням ризиків. Розроблені сценарії мають бути реалістичними і базуватися на аналізі світового досвіду виникнення аварійних дій, що призвели до прогресуючого руйнування у подібних конструктивних схемах. Для оцінювання стійкості споруди проти прогресуючого руйнування

необхідно розглядати лише найнебезпечніші розрахункові схеми обвалення. Спрямовувати аварійні дії і враховувати їх наслідки слід найбільш невиконаним шляхом, враховуючи розміщення імовірного джерела дій [3].

Під час перевірки каркаса на прогресуюче руйнування розрахункові опори матеріалів (сталі, бетону, арматури) приймаються такими, що дорівнюють їх характеристичним значенням. Постійні та квазіпостійні значення навантажень під час перевірки стійкості будинку прогресуючому руйнуванню слід приймати згідно з ДБН В.1.2-2 [2]. Змінні короточасні навантаження під час розрахунку на прогресуюче руйнування не враховуються. Коефіцієнти сполучень мають призначатися як для аварійної розрахункової ситуації, коефіцієнти надійності за навантаженням приймаються за одиницю. Розрахунок міцності та стійкості елементів каркаса проводять на аварійне сполучення дій, що включає постійні і тривалі тимчасові навантаження, а також зміни каркасу споруди від локальних гіпотетичних обвалень. Слід також враховувати дію і характер можливого руйнування вищерозташованих поверхів або розміщених поруч будівель і споруд. Також, вибираючи сценарій та зважаючи на ефекти від руйнування, слід враховувати за потреби експлуатаційну придатність шляхів евакуації для забезпечення їх основної функції після припинення аварійної дії.

Величина деформацій і ширина розкриття тріщин під час розрахунків на прогресуюче руйнування не обмежуються. Водночас при розрахунку каркасів захисних споруд слід враховувати перерозподіл зусиль від деформацій внаслідок аварійної дії, геометрично-нелінійну роботу конструкцій або/та можливість спричинити пошкодження супутніх систем (наприклад трубопроводів високого тиску, високовольтних ліній тощо) через вторинні фактори ураження.

У разі недостатності (за будь-якою сценарію локального руйнування) несучої здатності хоча б одного з елементів каркаса, крім елемента, що був умовно “вилучений” з розрахункової схеми, необхідно вжити додаткових заходів щодо забезпечення стійкості і живучості каркаса з метою недопущення прогресуючого руйнування.

Схеми локальних (гіпотетичних) руйнувань під час аварійних дій для більшості захисних споруд розподіляються на два основних випадки: обвалення частин перекриттів або покриттів та виключення із роботи вертикальних несучих елементів. Навантаження від аварійного обвалення вищерозташованого перекриття на нижчерозташоване приймається в межах найбільшої за розмірами чарунки вільного спирання плити між несучими пролітними конструкціями за умови розрізної схеми спирання плит. При цьому окремо розраховується і враховується коефіцієнт динамічності перевантаження нижчерозташованого перекриття. При нерозрізній і композитній схемах кріплення плит до несучих пролітних конструкцій такий варіант руйнування не розглядається. Обвалення може бути частковим або повним залежно від типу конструктивної схеми та інших чинників. Особливу увагу слід звертати на випадки, коли падіння пролітних елементів може

збільшити розрахункову довжину вертикальних несучих конструкцій та призвести до втрати ними стійкості.

У разі виключення з роботи вертикальних несучих елементів (колон, пілонів, балок-стінок, далі – колон) найнебезпечнішою схемою локального руйнування під час забезпечення одиничної живучості як правило є руйнування (видалення) окремої колони. У разі видалення колони слід враховувати, що вузли, які примикають до неї, не видаляються. Також, у разі аварійного видалення колон у розрахунку розглянути можливість додаткового часткового або повного обвалення примикаючих конструкцій від вищерозташованого перекриття на нижчерозташоване.

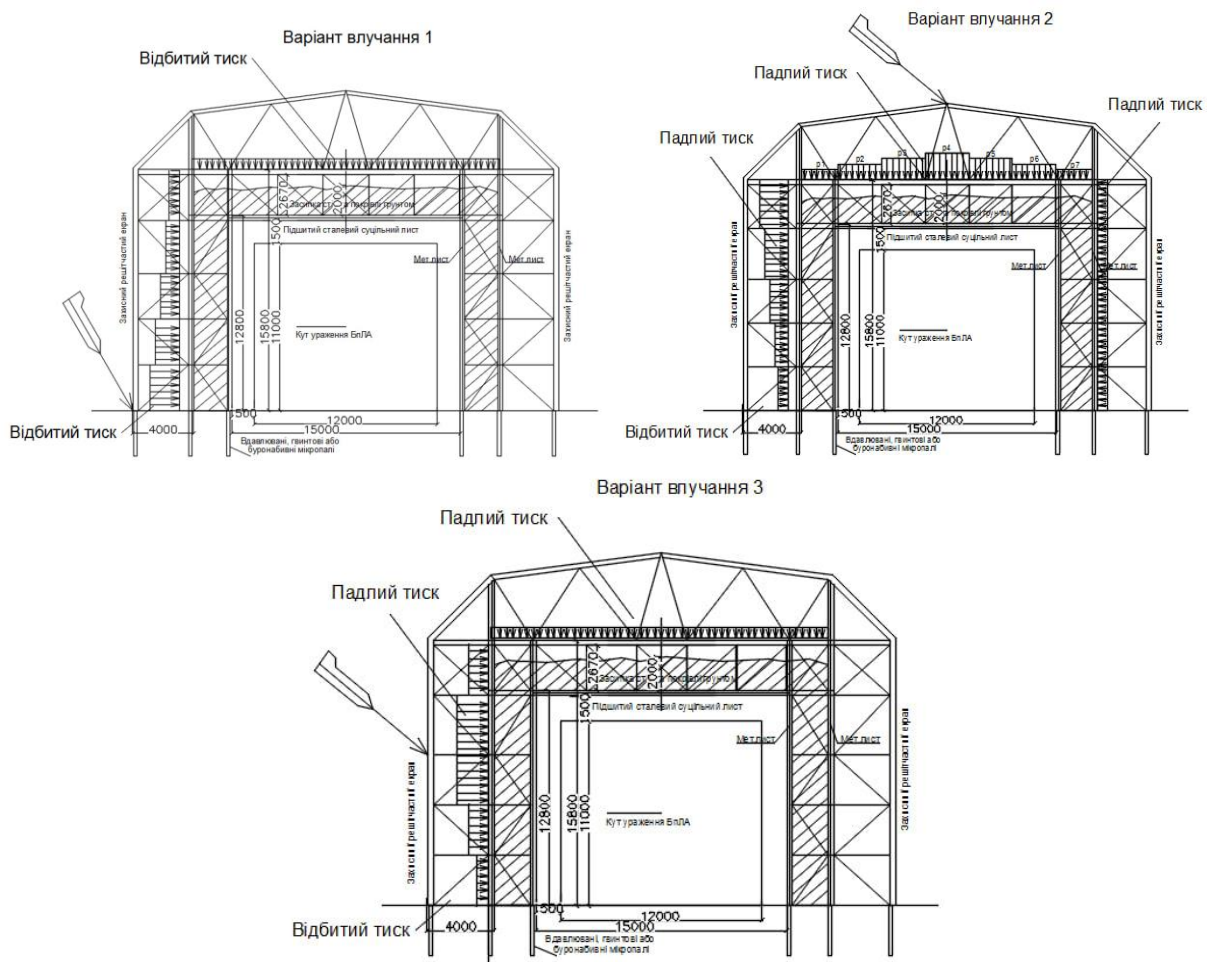


Рис.5.1. Приклад сценаріїв неодночасних дій влучань і принципового розподілу падлого і відбитого тиску на захисну інженерну споруду другого рівня захисту типу “Шелтер”

Крім вищенаведеного, відповідно до ДБН В.1.1-7 [4] захисні споруди мають бути на стійкими до прогресуючого руйнування внаслідок пожежі. Також окремо конструкції мають бути захищені від вогню згідно з [5].

Гарантований термін експлуатації інженерних споруд першого рівня захисту може не регламентуватися внаслідок їх тимчасового характеру (або прийматися на мінімальному рівні 2–5 років), проте такі споруди мають регулярно відновлюватися або замінятися за результатами технічних оглядів. Захисні споруди другого рівня інженерного захисту повинні мати гарантований термін експлуатації не нижче нормативного терміну

експлуатації споруди. Захисні споруди третього рівня захисту повинні мати гарантований термін експлуатації без урахування влучань – 100 років. Категорії відповідальності елементів споруди можуть бути прийняті такими:

- основні несучі елементи каркаса остову для споруд третього рівня захисту, ядра для споруд другого рівня захисту, інші найбільш відповідальні конструкції забезпечення основної функції споруди – категорія А;
- захисні розподільчі елементи, конструкції оболонок та тюфяків для споруд третього рівня захисту, предетонаційні екрани для споруд другого рівня захисту, другорядні конструкції забезпечення основної функції споруди – категорія Б.

Сценарії та схеми дій мають бути визначені реалістичними у найбільш невігідних варіантах з урахуванням специфіки конфігурації та розташування елементів ОКІ та характеристик ЗПН.

На рис. 5.1 показані приклади сценаріїв неодночасних дій факторів ураження ЗПН на захисні споруди другого рівня захисту типу “Шелтер” а на рис. 5.2. – відповідно на захисні споруди третього рівня захисту.

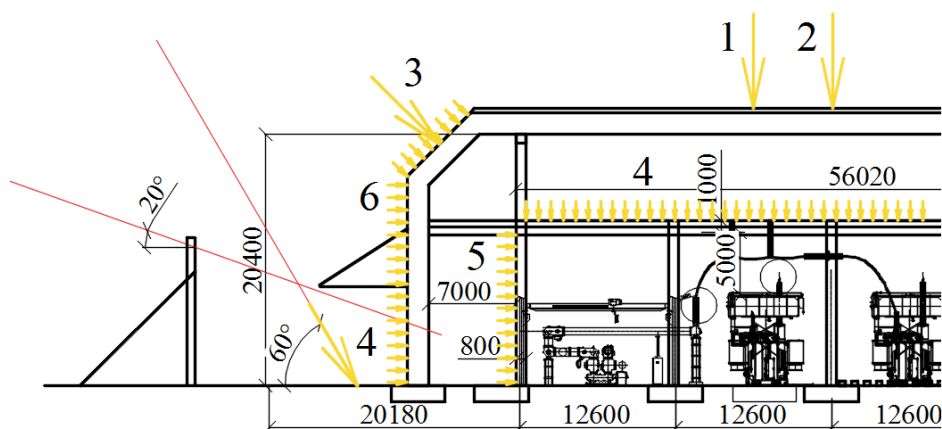


Рис.5.2. Приклад сценаріїв неодночасних дій на захисну інженерну споруду третього рівня захисту: 1 – удар ракети в зоні над серединою прольоту остову каркаса, 2 – удар ракети в зоні над колоною каркасу остову, 3 – під кутом від удару ракети, 4 – місце влучання і вибух БЧ у разі максимально близького невлучання (розраховується рух ВУХ та осколків у глибину споруди), 5 – тиск ВУХ у ґрунті від підриву БЧ ракети на тюфяку, згідно з нормами ПФ-43 [8], 6 – еквівалентний квазістатичний тиск 2 кг/см^2 на передню відкриту частину споруди (або порохований тиск від непрямого влучання за межами споруди)

Пошкодження елементів ОКІ внаслідок ураження ЗПН можуть поділятися на такі:

1) Первинні:

- осколкова дія первинними уламками;
- фугасна дія ВУХ;
- проникна дія ЗПН;
- силова дія;
- запалювальна дія окремих видів БЧ або решток пального ЗПН;
- інша дія (електромагнітна тощо).

2) Вторинні:

- осколкова дія вторинними уламками;
- удар частин ЗПН;
- проникна дія частин ЗПН;
- займання від пожежі;
- падіння частин інших елементів, конструкцій тощо;
- опосередкована дія (ураження систем безпеки тощо) [6, 7].

Точні розрахунки інженерних захисних споруд на дію факторів ураження, таких як вибухи, удари, проникну здатність уламків тощо рекомендовано проводити за допомогою спеціальних розрахункових комплексів на основі методу скінченних елементів, враховувати дані натурних та чисельних експериментів, досвід ураження аналогічних та подібних споруд у разі наявності такого (див. розділ 4). Дані щодо характеристик факторів ураження ЗПН можуть бути взяті з довідкових та науково-технічних джерел. При цьому для ракет та БпЛА рекомендовано зменшувати їх масу у момент влучання порівняно зі стартовою вагою; розрахункову швидкість рекомендовано зменшувати відповідно до значень у момент влучання і реальної траєкторії; при розрахунку руху БЧ проникного типу всередині конструкції споруди, слід розглядати тільки вагу БЧ, так як корпус ЗПН руйнується в момент удару. Для уточнення параметрів ЗПН противника рекомендовано використовувати дані щодо натурних експериментальних досліджень захисних властивостей конструкцій і споруд, а також статистичні відомості щодо реальних влучань ЗПН в ОКІ.

5.2. Попереднє визначення параметрів захисних конструкцій

Нижче наведена наближена методика визначення параметрів конструктивного інженерного захисту і компонування захисних товщ споруд за умови прямого поодинокого влучання снарядів, бомб, БпЛА або ракет згідно з [8] (далі снарядів). Система захисту заглиблених споруд від дії прямих влучань снарядів складається із чотирьох обов'язкових компонентів (зверху вниз):

1) обсипка споруди, яка виконує маскувальні функції, а також перешкоджає розльоту уламків і в деяких випадках ініціює передчасно БЧ;

2) тюфяк, який виконує роль затримуючої плити та призначений для зупинки процесу механічного проникнення заряду і, відповідно, віддалення місця його можливого вибуху в разі фугасної дії;

3) розподільча товща, яка має амортизувати вибухову хвилю під час вибуху заряду на тюфяку;

4) несучий шар – каркас остову заглибленої конструкції, який має витримувати як власну вагу з нормальним тиском ґрунту, так і варіанти тиску від ВУХ в землі – вертикальної або бічної (рис. 5.3).

Ударне навантаження, яке припадає на обсипку та тюфяк, може бути пораховане як механічна сила удару, яка діє на фізичне тіло під час контакту

з іншим фізичним тілом. Відтоді захисний шар (тюфяк) має бути окремо розрахований на ударне навантаження під час влучання, особливо з огляду на великі значення сили удару для швидкісних ракет і проникний тип їх БЧ.

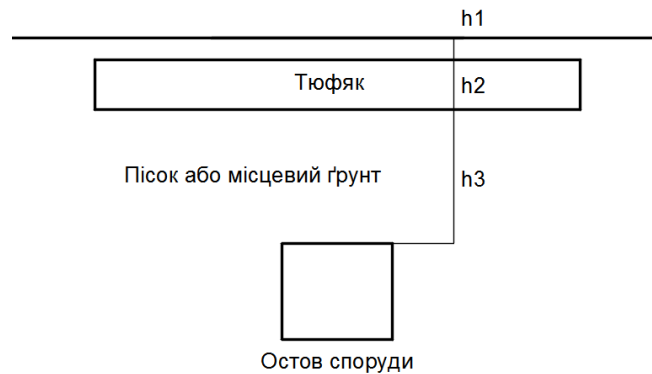


Рис. 5.3. Схема улаштування захисту заглибленого об'єкта

Спочатку обчислюють радіус h_{ϕ} руйнування ґрунту:

$$h_{\phi} = K_{\phi} \sqrt[3]{C} - \mathcal{L}, \quad (5.1)$$

де K_{ϕ} – коефіцієнт податливості середовища фугасної дії – руйнування або відколу, визначається за табл. 5.1;

C – вага ВР у БЧ, кг;

$\mathcal{L} = L/2$, відстань від центра заряду до поверхні, на якій механічно зупинився снаряд, в метрах;

L – довжина снаряду (яка для ракети може бути наближено прийнята, як довжина її БЧ).

Загальну глибину проникнення заряду (в цьому випадку ракети) визначають за таким емпіричним виразом:

$$h_{\text{пр}} = \lambda K_{\text{пр}} \frac{P}{d^2} \nu \cos \alpha \quad (5.2)$$

де $h_{\text{пр}}$ – глибина проникнення снаряду по нормалі до зовнішньої поверхні перешкоди в метрах;

λ – коефіцієнт, який залежить в основному від форми снаряду, рівний 1,3 під час стрільби бетонобійними снарядами по бетону і 1,0 у інших випадках;

$K_{\text{пр}}$ – коефіцієнт податливості даного середовища проникненню (див. табл. вище);

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

d – діаметр снаряду (авіабомби, ракети), м;

ν – швидкість снаряду (авіабомби, ракети), у момент зустрічі із перешкодою, в м/с;

α – кут між перпендикуляром до зовнішньої поверхні перешкоди до дотичної з траєкторією снаряду, у разі ракет це кут зустрічі з перешкодою.

Таблиця 5.1

Коефіцієнт податливості середовища дії удару або вибуху

Найменування середовища	Значення коефіцієнтів		
	Проникнення K_{np}	Вибуху $K_{вз}$	Фугасної дії $K_{ф}$
Ґрунт рихлий свіжонасипаний	0,0000130	0,60	1,40
Ґрунт звичайний	0,0000065	0,53	1,07
Пісок щільний	0,0000045	0,50	1,04
Супісок	0,0000050	0,50	1,00
Суглинок	0,0000060	0,50	1,00
Глина щільна	0,0000070	0,50	1,00
Скеля вапнякова або піщана	0,0000020	0,25	0,92
Скеля гранітна або гнейсова	0,0000016	0,20	0,86
Сосна	0,0000050	0,30	0,60
Дуб, бук, ясень	0,0000040	0,30	0,60
Цегляне мурування насухо	0,0000030	0,25	0,96
Кам'яне мурування насухо	0,0000030	0,25	0,96
Цегляне мурування на цементному розчині	0,0000025	0,25	0,88
Кам'яне мурування на цементному розчині	0,0000020	0,20	0,84
Бутобетон	0,0000016	0,18	0,70
Бетон марки 200 кг/см ²	0,0000013	0,18	0,65
Залізобетон марки 200 кг/см ²	0,0000011	0,14	0,60
Фортифікаційний бетон марки 400 кг/см ²	0,0000010	0,16	0,60
Фортифікаційний залізобетон марки 400 кг/см ² :			
з гнучким противідколом	0,0000008	0,13	0,52
з жорстким противідколом	0,0000008	0,13	0,42

Глибина проникання снаряду у шаруватому середовищі, яка визначається заміною цього середовища еквівалентним однорідним середовищем, пропорційна співвідношенню коефіцієнтів K_{np} для матеріалів, які входять у захисний шар. Повна глибина воронки h_B визначають відповідно до виразу

$$h_B = h_{\phi} + h_{вз}, \quad (5.3)$$

де h_{ϕ} – глибина проникання;

$h_{вз}$ – глибина вибухової воронки, яку визначають за таким виразом:

$$h_{вз} = K_{вз} \sqrt[3]{C} - C, \quad (5.4)$$

де $K_{вз}$ – коефіцієнт податливості середовища вибуху (див. табл. 5.1).

Товщина зовнішньої обсіпки, яка призначена, окрім маскуванню, послабити ударну та осколкову дію, має бути не менше 30...50 см. Товщина тюфяка в шаруватих конструкціях за невеликою товщини обсіпки визначається за формулою:

$$h_T = 1,5h_{np}, \quad (5.5)$$

де h_{np} – глибина проникнення заряду по формулі (5.2), але з урахуванням взяття K_{np} для матеріалу тюфяка.

Стіни і покриття остовів захисних споруд приймають, розраховавши конструкції на навантаження від власної ваги, тиску ґрунту та тиску від ВУХ за законами будівельної механіки та опору матеріалів. Розрахунок конструктивних параметрів стін або каркаса несучого остову залежить від відстані b між снарядом, який проник у ґрунт, і стіною. Якщо значення $b = 0,75h_{np}$, розрахунок виконується на епізодичне еквівалентне квазістатичне характеристичне навантаження від тиску ВУХ 3 кг/см^2 , якщо $b = 1h_{np}$ епізодичне еквівалентне квазістатичне характеристичне навантаження приймається 1 кг/см^2 . Відстань b може бути прийнята рівною консольному виносу тюфяка. Очевидно, що збільшувати значення b завдяки консольному виносу тюфяка, набагато економніше, аніж докладати більше навантаження на цілий остов заглибленої споруди. Конструктивно тюфяк являє собою плаваючу плиту на пружній основі, яка не повинна бути сполучена жорстко із несучим остовом захисної споруди. Товщина розподільчого шару у шаруватих конструкціях визначається виразом:

$$H_p = mh_{\phi}, \quad (5.6)$$

де m – коефіцієнт, який залежить від несучої здатності конструкції остову.

Якщо конструкція перекриття остову захисної споруди може витримати додаткове епізодичне еквівалентне статичне характеристичне навантаження від вибуху 1 кг/см^2 , то $m = 1$, якщо може витримати додаткове епізодичне еквівалентне статичне характеристичне навантаження від вибуху 3 кг/см^2 , то $m = 0,75$. Проміжні значення допускається приймати за інтерполяцією.

З точки зору економічності, в більшості випадків вигідніше збільшувати розподільчу товщу на 25%, ніж в три рази збільшувати навантаження на перекриття.

Приклад 5.1. розглянемо крилату ракету Х-55/Х-555. Довжина БЧ становить $L = 1,51 \text{ м}$, вага вибухової речовини $C = 292,5 \text{ кг}$, діаметр $d = 0,77 \text{ м}$, швидкість у момент влучання $v = 84,9 \text{ м/с}$, кут на підльоті до об'єкта ураження $\alpha = 10^\circ$, $P = 525 \text{ кг}$, БЧ фугасної дії. Для ракети Х-55/Х-555, λ приймемо рівним 1,0. Для однорідного нешаруватого ґрунту обсіпки (супісок) коефіцієнт податливості цього середовища проникненню приймемо $K_{np} = 0,0000050$, тоді загальна глибина проникнення ракети в разі фугасної дії становитиме

$$h_{np} = \lambda K_{np} \frac{P}{d^2} v \cos \alpha = 1,0 \cdot 0,0000050 \cdot (525/0,77^2) \cdot 84,9 \cos 10^\circ = 0,37 \text{ м}.$$

Коефіцієнт податливості середовища вибуху для супіску $K_{вз}$ дорівнює 0,50. Глибина вибухової воронки $h_{вз} = K_{вз} \sqrt[3]{C} - C = 0,5 \sqrt[3]{292,5} - 0,755 = 2,94 \text{ м}$. Повна глибина воронки $h_{в} = h_{\phi} + h_{вз} = 5,88 + 2,94 = 8,82 \text{ м}$.

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 $K_{\text{пр}} = 0,0000008$. Тоді товщина тюфяка за невеликої товщини обсіпки становить:

$$h_t = 1,5h_{\text{пр}} = 1,5 \cdot 1,0 \cdot 0,0000008 \cdot (525/0,77^2) \cdot 84,9 \cos 10^\circ = 0,09 \text{ м.}$$

У разі, коли БЧ проникає збоку від споруди, для однорідного нешаруватого ґрунту (супісок): $K_{\text{ф}} = 1$. Тоді

$$C = L/2 = 1,51/2 = 0,755 \text{ м;}$$

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

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: $H_p = m \cdot h_{\text{ф}} = 5,88 \cdot 1 = 5,88 \text{ м}$. Отже, округлено приймаємо розподільчий шар завтовшки $6,0 \text{ м}$. Аналогічні чисельні дослідження були проведені для всіх типів ракет, що розглядаються. Результати наведені в табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Сумарна захисна товща заглиблених захисних споруд залежно від типу ракети

Тип ракети	Загальна глибина $h_{\text{пр}}$ 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
X-59	0,92	0,3	0,15	0,22	4,91	4,91	5,43
X-22	4,37	0,3	0,78	1,17	6,62	6,62	7,4
9М723 “Іскандер”	6,29	0,3	1,01	1,51	5,20	5,20	6,21
X-55/X-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
X-47М2 “Кинджал”	7,28	0,3	1,17	1,75	5,48	5,48	6,64
X-101	0,49	0,3	0,08	0,12	5,60	5,60	5,68
X-59	4,32	0,3	0,69	1,04	4,69	4,69	5,38
X-35	0,6	0,3	0,1	0,14	4,0	4,0	4,10

Вище розглянуто заглиблений тип захисної споруди із мінімальною обсіпкою $0,3 \text{ м}$. Найбільш небезпечною для заглиблених споруд є ракета X-22, оскільки захист від її прямих влучань потребує товщини розподільчого шару $6,62 \text{ м}$. Натомість ракета X-47М2 “Кинджал” через значну швидкість потребує найбільшої товщини тюфяка $1,75 \text{ м}$.

У резерв надійності для забезпечення руйнування ОКІ, зокрема від дії перспективних ЗПН, пропонується зведений варіант компоновки заглиблених споруд. На рис. 5.4 наведено приклад компоновки з розмірами для обраного ґрунту розподільчого шару – супісок.

Оскільки напрямок прильоту ракети не може бути прогнозованим, то розширення тюфяка прийняте рівномірним довкола споруди.

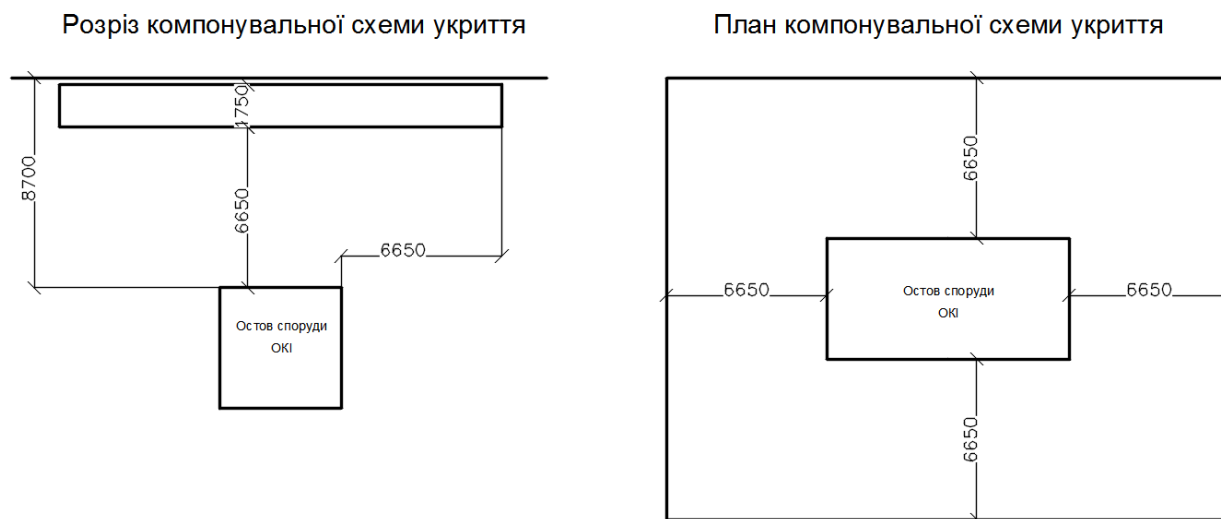


Рис. 5.4. Принципові розміри схеми компонування заглибленої споруди захисту критичного елемента ОКІ

Для інших типів ґрунтів, згідно з таблицею, наведеною в [8], також отримано параметри схем компонування заглиблених споруд. Рихлий ґрунт та скелясті типи ґрунтів не розглядалися. Отримані результати наведені в табл. 5.3. Матеріал тюфяка – взято фортифікаційний залізобетон марки 400 з жорстким або гнучким противідколом.

Таблиця 5.3
Сумарна захисна товщина заглиблених споруд залежно від типу ґрунту розподільчого шару

Тип ґрунту	Прийнята товщина обсіпки, м	Товщина тюфяка при тонкій обсіпці, 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

Якщо товщина тюфяка 1,75 м і невелика товщина обсіпки, він розрахований насамперед на ударне навантаження від ракети. Передбачено, що на тюфяку ракета зупиниться і вибухне, причому він частково руйнується від механічного проникнення та можливого вибуху. Армування плити тюфяка має бути виконано у декілька сіток зі зміщенням по глибині, у двох

напрямок, з враховуючи додатковий противідкольний шар в нижній зоні, відсічки та шви бетонування етапами. Під плитою облаштовується подушка із ущільненого щебеню не менше 300 мм, а також бетонна підготовка 150 мм. Для зменшення впливу опадів на ґрунт обсіпки по верху плити тюфяка доцільно зробити водовідведення у спеціальні дренажні канавки тощо. При високому рівні 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 бути незаглиблені. Рішення для частково заглиблених споруд мають перевагу в тому, що виїнятий для заглиблення ґрунт може бути використаний як обсіпка, досягаючи балансу земляних робіт. З іншого боку, при цьому втрачається рівність поверхні над спорудою, а заодно її маскувальні властивості, зростають обсяги зовнішнього планування території.

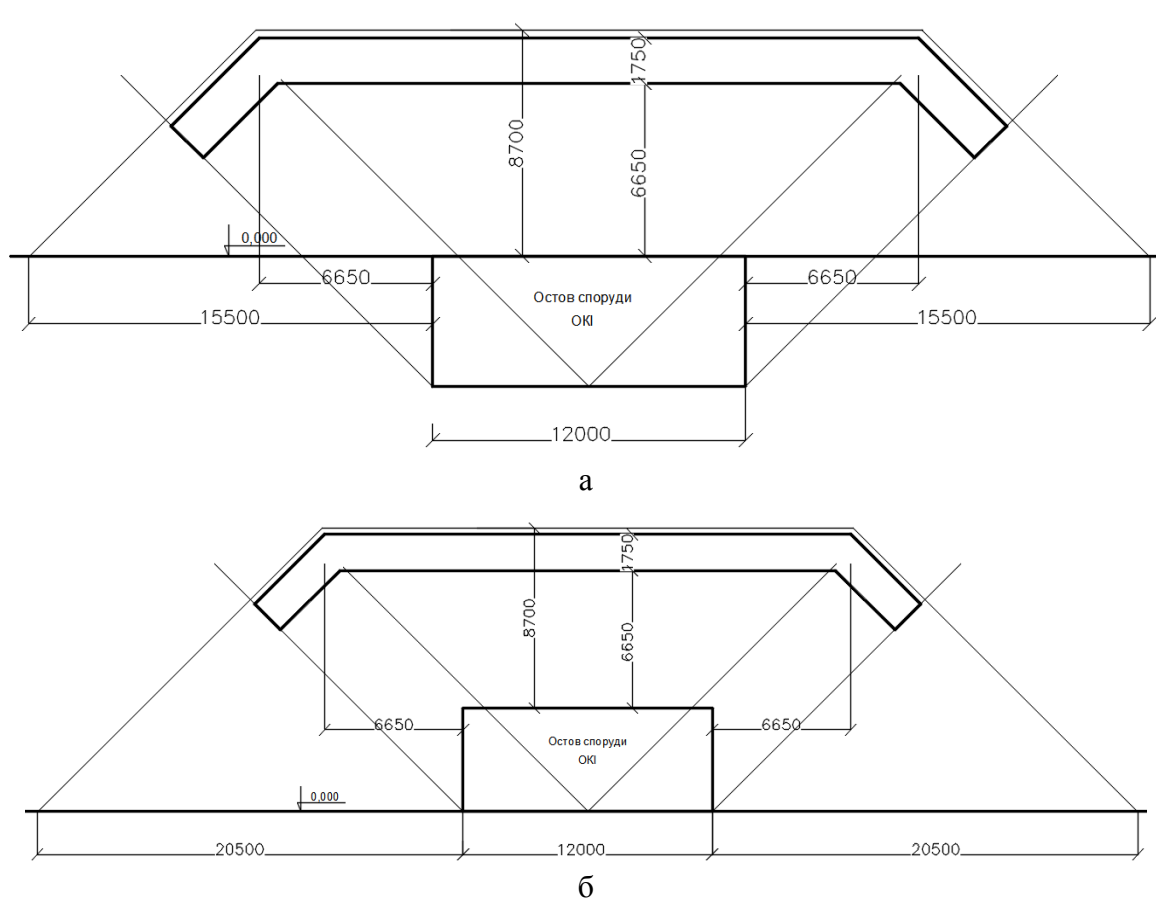


Рис. 5.5. Приклад розрізу компоувальної схеми інженерної захисної споруди: а – із частковим заглибленням; б– без заглиблення з обсіпкою

Рішення для незаглиблених споруд, на відміну від інших можуть бути реалізовані для існуючих (переважно, надземних) об'єктів. Але при тому значно збільшуються обсяги земляних робіт, а обсіпка ґрунтом займає значну площу довкола споруди та демаскує її. Приклади компоувальних схем захисних споруд із частковим заглибленням та без заглиблення для умовного критичного елемента ОКІ завширшки 12 м показано на рис. 5.5.

Описані рішення потребують також додаткових обсягів залізобетону для облаштування “навісу” щоб компенсувати недостатню товщу ґрунту в разі кутових влучань, обвалування із відповідними стінами тощо.

Доцільним є заглиблене розміщення найбільш критичних елементів ОКІ або їх вузлів [9].

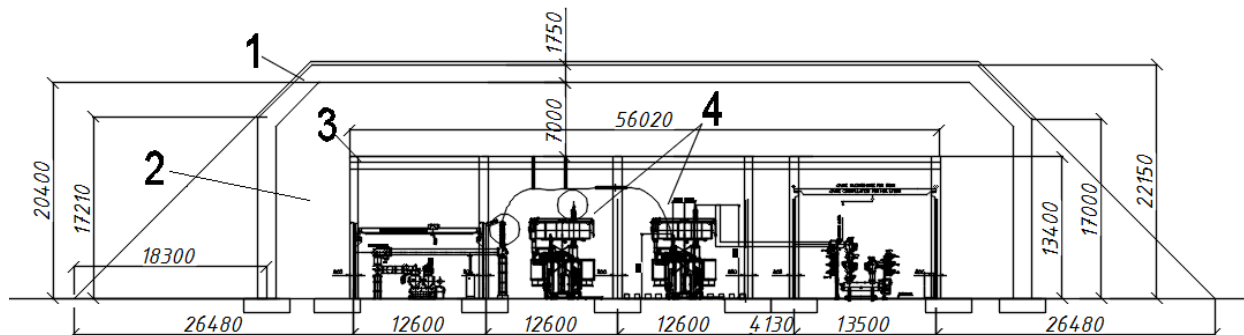


Рис. 5.6. Приклад перерізу компоновки елементів інженерного захисту нової підстанції 330 кВ із ґрунтовою обсіпкою: 1 – залізобетонна оболонка (тюфяк); 2 – розподільча товща; 3 – остов захисної споруди; 4 – елементи ОКІ, які захищаються

Найпростішим з погляду технологічності є улаштування захисної споруди без заглиблення з обсіпкою. На рис. 5.6 показано принциповий вигляд розрізу захисної споруди для підстанції 330 кВ у разі її побудови на новому місці.

5.3. Визначення дій основних факторів ураження ЗПН на несучі конструкції споруд інженерного захисту об’єктів критичної інфраструктури

Нижче розглянемо основні положення розрахунків елементів та перевірок несучих конструкцій від дії основних факторів ураження ЗПН.

Дія ВУХ. Тиск від повітряної ВУХ в основному визначається залежно від маси заряду ВР, відстані від центру вибуху та умов середовища. Нижче наведена наближена методика розрахунку параметрів ВУХ. Дія повітряного вибуху залежить від приведеної відстані:

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{Q_{ef}}}, \quad (5.7)$$

де R – віднесення точки вибуху від об’єкта, що досліджується; ефективна маса $Q_{ef} = (1 - \varepsilon)\alpha M_{ex}$,

ε – частка енергії вибуху, що витрачається на утворення воронки (для скельних порід $\varepsilon = 0,05$; для м’яких ґрунтів $\varepsilon = 0,2$; якщо вибух йде у повітрі без утворення воронки $\varepsilon = 0$);

α – відношення питомої енергії вибуху вибухової речовини до питомої енергії тротилу.

Надлишковий тиск на фронті ВУХ рівний:

$$\Delta p_f = \begin{cases} \left(\frac{0.92}{\bar{R}} + \frac{3.5}{\bar{R}^2} + \frac{10.6}{\bar{R}^3} \right) \text{ при } 1.2 \leq \bar{R} < 17.8 \text{ м / кг}^{1/3} \\ 4.2 \bar{R}^{-1.45} \text{ м / кг}^{1/3} \text{ при } 17.8 \leq \bar{R} < 1000 \text{ м / кг}^{1/3} \end{cases} \quad (5.8)$$

Наведені формули застосовні, якщо $R > 3$ м. На утворення ВУХ впливає також, є вибух повітряним чи наземним, форма заряду ВР, його заглиблення у ґрунт перед вибухом.

Тривалість фази стиснення τ_+ , у секундах при цьому дорівнює

$$\tau_+ = \begin{cases} 1.7 \cdot 10^{-3} \sqrt[3]{Q_{ef}} \sqrt{\bar{R}} \text{ при } 1.2 \leq \bar{R} < 10 \text{ м / кг}^{1/3} \\ 6.594 \cdot 10^{-3} \sqrt[3]{Q_{ef}} [\lg(0.4\bar{R})]^{0.4} \text{ при } 10 \leq \bar{R} < 1000 \text{ м / кг}^{1/3} \end{cases} \quad (5.9)$$

Оскільки тривалість дії ВУХ у разі детонаційних вибухів зазвичай вкрай мала, коливання і міцність конструкцій можна визначати за допомогою теореми імпульсів [10], для чого використовується питомий імпульс фази стиснення i_+ , який чисельно рівний площі під кривою тиску у цій фазі (рис. 5.7). При $12 \leq \bar{R} < 1000 \text{ м / кг}^{1/3}$

$$i_+ = 350 \frac{\sqrt[3]{Q_{ef}}}{\bar{R}}, \text{ Па} \cdot \text{с}. \quad (5.10)$$

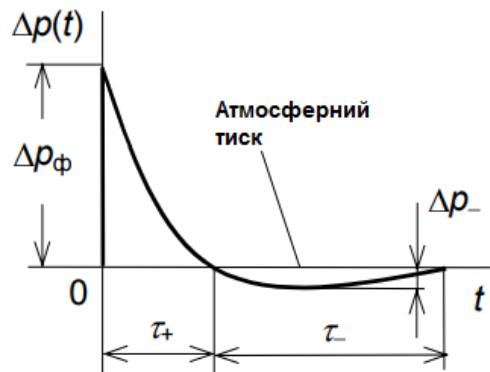


Рис. 5.7. Параметри часу і тиску детонаційної ВУХ у повітрі [10]

Розподіл у фазі τ_+ може бути спрощено прийнятий за трикутним законом. Негативна фаза τ_- , як правило, менш руйнівна для масивних інженерних захисних конструкцій, тому може не враховуватися.

Для більш точних розрахунків наразі поширеними є залежності, зокрема відомі як формули Кінгері-Булмаша [11].

На основі параметрів вибуху можна говорити про стійкість споруди до дії ВУХ. Довідково, номограма для оцінки ураження звичайних будівель від тиску та імпульсу ВУХ показана на рис. 5.8. Точні спеціальні розрахунки для інженерних захисних споруд слід проводити із урахуванням власних частот коливань і динамічного відгуку конструкцій (метод одиночного ступеню свободи та ін.) [10], тут вони не наводяться із умов скороченості обсягу книги.

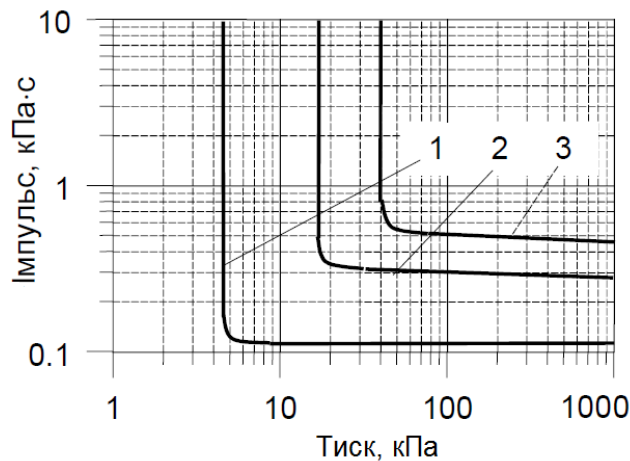


Рис. 5.8. Номограма для оцінювання ураження будівель: 1 – межа мінімальних руйнувань; 2 – межа значних пошкоджень; 3 – руйнування будівель (зруйновано 50÷70 % стін) [10]

Прогини і переміщення основних несучих конструкцій. Як було зазначено раніше, під час підрахунків на аварійні сполучення та на живучість, обмеження за II граничним станом згідно з ДБН В.1.2-2 – коливання, прогини і переміщення – дозволяється не брати до уваги, але вони все одно можуть обмежуватися з точки зору геометричної нелінійності та функціонування критичного обладнання, або ж згідно з ДСТУ Б.В.1.2-3 без урахування естетико-психологічних факторів.

Розрахунок проникної дії та осколкового ураження. Швидкість розльоту уламків під час вибуху може бути прийнята за формулою [21]:

$$V_p = 0.5D\sqrt{\varphi_1\alpha / (2 + \alpha / \varphi)}, \quad (5.10)$$

де параметр $\alpha = m_{вр}/m_m$ залежний від $m_{вр}$ – маси вибухової речовини БЧ;

m_m – маса металу корпусу БЧ;

φ – коефіцієнт, який враховує форму БЧ, рівний 3,33 для сферичної, 4 для циліндричної та 6 для пласкої форми;

$\varphi_1 = 0,8..0,9$ – коефіцієнт, який враховує втрати енергії, які йдуть на руйнування оболонки або на прорив продуктів детонації в зазори і передається осколками до повітря у момент розльоту.

D – швидкість детонації вибухової речовини.

Під час розрахунків слід враховувати наявність як первинних, так і вторинних уламків від конструкцій та захисних елементів.

Якщо розраховується проникна здатність власне ракети або іншого снаряду, то береться їх кінцева швидкість у момент влучання в ціль, яка зазвичай значно нижча від максимальної, заявленої у технічних характеристиках.

Швидкість руху умовного снаряду і швидкість руху уламків у фронтальній ВУХ дозволяється не враховувати, тому що снаряд рухається істотно повільніше відносно уламків, а момент вибуху зазвичай відповідає фактичній зупинці снаряду в момент ініціації заряду під час співударяння з перешкодою. Для надзвукових швидкостей влучання, коли швидкість

боєприпасу V_c перевищує швидкість звуку матеріалу перешкоди, можна застосувати таку формулу глибини проникання в матеріал [6]:

$$h = \frac{l_0}{2\chi_0} \frac{\rho_{02}}{\rho_{01}} \ln \left(1 + \chi_0 \frac{\rho_{01} V_c^2}{H} \right) \quad (5.11)$$

де χ_0 – коефіцієнт форми головної частини снаряду, для конічної головної частини $\chi_0 = \sin^2 d$ (де d – кут конусності), а для снаряду з оживальною головною частиною $\chi_0 = (8(R/d) - 1) / (24(R/d)^2)$;

R – радіус оживала;

d – калібр снаряду;

H – динамічна твердість матеріалу перешкоди.

l_0 – довжина снаряду.

Параметри ρ_{01} , ρ_{02} у формулі (5.11) – відповідно густина матеріалу перешкоди та оболонки снаряду.

Наближені інженерні розрахунки. Такі обчислення виконують, як попередні для якісного оцінювання уражальної здатності БЧ ЗПН, під час підриву на поверхні або із зануренням БЧ у захисну масивну однорідну конструкцію. Вага контактного заряду, яка необхідна для підірвання цегляних, кам'яних, бетонних та залізобетонних конструкцій типу колон, стовпів, балок та ін. (якщо їх ширина не перевищує подвоєну товщину), розраховується за формулою [11]:

$$C = ABR^3, \quad (5.12)$$

де C – вага заряду в кілограмах;

A – коефіцієнт, який залежить від властивостей матеріалу що підривають та типу ВР;

B – коефіцієнт, який залежить від розташування заряду;

R – необхідний радіус руйнування у метрах.

Значення коефіцієнтів A і B , наведено у табл.5.4,5.5 нижче.

Таблиця 5.4

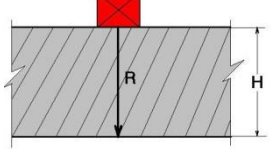
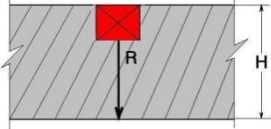
Значення коефіцієнта міцності матеріалу A

Найменування матеріалу	Значення A	Примітка
Бетон: будівельний	1,50	
фортифікаційний	1,80	
Залізобетон: для вибивання бетону	5,00	Арматура не перебивається
для вибивання бетону із частковим перебиванням арматури	20,0	Перебиваються прутки, розташовані найближче до зарядів

Зосереджені контактні заряди для пробивання окремих отворів у плитах, стінах і схожих конструкціях із цегли, каменя, бетону та залізобетону розраховують за формулою (5.12) зі збільшенням у два – три рази.

Таблиця 5.5

Значення коефіцієнта розташування заряду B

Схеми розташування та найменування зарядів	Значення коефіцієнта B		Розрахункова величина радіуса руйнування
	без забивки	із забивкою	
Зовнішній заряд 	9,0	5,0 (для залізобетону 6,5)	$R = H$
Заряд у ніші 	5,0	3,5	$R = H$

Приклад обчислення вибивання бетону із частковим перебиванням арматури від заряду БЧ ЗПН типу ракети.

Рахуємо вибивання бетону із частковим перебиванням арматури, при ракетному ураженні противником залізобетонного тюфяка захисної споруди.

Прийнявши товщину плити 1,75 м (в резерв надійності – без бетонної підготовки та можливого збільшення товщини бетону зверху для створення ухилів водовідведення) отримуємо: $R = 1,75$; $A = 20$ для випадку із частковим перебиванням арматури (яке потрібне для проникнення ракети в глибину); коефіцієнт $B = 9$, тому що навіть у разі проникнення ракети на розрахункову глибину центр заряду проникної БЧ, як правило, лишається вище поверхні бетону. Отже, $C = 20 \cdot 9 \cdot 1,75^3 = 964,7$ кг.

У ракети Х-22 тип ВР у БЧ – це ТГАГ-5, сплав із тротилу – 60%; гексогену – 24%; алюмінієвого порошку і пудри – 16%; головакса (флегматизатора) – 5% понад 100%. Тротильовий еквівалент ТГАГ-5 наближено буде рівний $K_T = 0,6 \cdot 1 + 0,4 \cdot 1,35 = 1,14$ [13].

Отриманий результат набагато більше, ніж вага ВР у найбільшій ракеті Х-22, яка у переведенні до тротил еквіваленту становить $C = 630 \cdot 1,14 = 718,2$ кг. Отже, перебивання армування не відбувається.

Важливо також зазначити, що навіть за часткового перебивання верхнього армування (варіант, коли проникна БЧ занурюється повністю у тюфяк), залізобетонна плита із багаторівневим, а особливо із фіброармуванням буде зберігати цілісність та не допускати пробиття до розподільчої товщі ґрунту і нижче.

Заглиблення (воронка) під час вибуху заряду. Під час вибуху заряду на поверхні споруди утворюється заглиблення, глибину якого обчислюють за формулою:

$$h = K_B \sqrt[3]{G_e} - h_0$$

де h_0 – відстань від центру заряду до поверхні середовища;

K_B – коефіцієнт викиду, значення якого для різних середовищ наведено в табл. 5.6.

Таблиця 5.6
Числові значення коефіцієнта K_B

Матеріали перепони	$K_B, \text{м/кг}^{1/3}$
Бутобетон	0,18
Бетон марки 300 і бутобетон з гранітним каменем	0,16
Бетон марки 400 на гранітному щебені	0,16
Залізобетон, виготовлений із бетону марки 300	0,14
Фортифікаційний залізобетон із бетону марок 400, 500, 600	0,13

Значення $h_0 = 0$, якщо заряд на поверхні. Отже, глибина заглиблення $h = K_B \sqrt[3]{G_e} - h_0 = 0,13 \cdot (630 \cdot 0,14)^{1/3} = 1,164$ м. Отримані дані корелюють із наявними даними РФ щодо максимального пробиття бетону відповідними ЗПН (найближче до ракети Іскандер-М), табл. 5.7. Заглиблення від вибуху слід розрізняти від початкового механічного занурення ракети у захисний залізобетонний тюфяк у разі влучання БЧ із затримкою, яке було розглянуто вище.

Таблиця 5.7
Наявні довідкові дані щодо пробиття бетону для різних ЗПН

ЗПН	Х-29	Іскандер-М	БЕТАБ-500	КАБ-500КР	КАБ-500Л
Орієнтовна глибина пробиття бетону, м	1	1,2	1	1,5	1,5

5.4. Загальні положення проєктування та проведення розрахунків окремих елементів захисту

Загальні конструктивні рекомендації із проєктування каркасів захисних інженерних споруд включають у себе наступні положення.

Залізобетонні і сталезалізобетонні елементи армують не менш ніж трьома сітками зі зміщеними кроками стержнів. Рекомендовано застосовувати жорстке армування, сталезалізобетонні, сталобетонні рішення. Також рекомендовано підвищувати зв'язність та міцність лобової товщі залізобетонних захисних конструкцій завдяки використанню фібробетону, обкладанню кам'яним матеріалом тощо.

У залізобетонних і сталезалізобетонних елементах слід передбачати із внутрішньої сторони противідкольний шар у вигляді металевих сіток із дрібною чарункою або у вигляді суцільних металевих листів, профілів, спеціальних полімерних покриттів, які здатні затримувати відколювання фрагментів бетону.

Для недопущення виникнення і дії факторів ураження на споруди мають бути вжиті всі заходи фізичного, інженерного пасивного і активного захисту. Найдієвішим є максимальне віддалення і зменшення імовірності ураження об'єкта. В необхідних випадках рекомендовано застосовувати теорію ризиків. Кінцевий вибір оптимальної конструктивної системи споруди

має здійснюватися з урахуванням факторів оцінювання життєвого циклу (див. розділ 6). Існуючі захисні споруди підлягають оцінюванню технічного стану і фізичної придатності, та, у разі ухвалення відповідного рішення реконструкції й підсиленню із застосуванням ефективних рамних сталевих, сталезалізобетонних конструкцій із засипкою ґрунтом.

Форми споруд та їх елементів мають бути зовні якомога більш обтічні для вибухових хвиль. Рекомендовано застосовувати багатозв'язні конструктивні схеми каркасів для перерозподілу зусиль у разі руйнування, проектувати елементи та з'єднання із переважно пластичним типом руйнування; використовувати спеціальну сталь підвищеної міцності, але із забезпеченням пластичного руйнування.

Перерізи колон рекомендовано переважно обирати рівностійкими із двома вісями симетрії за умови врахування зміни напрямку зусиль в разі аварійної ситуації; збільшувати перерізи несучих конструкцій, які можуть сприймати додаткові зусилля у разі настання аварій. Рекомендовано також передбачати знакозмінні різноспрямовані дії у з'єднаннях, передбачати заходи із відведення фактору небезпеки і захист від пошкодження головних елементів та деталей з'єднань. Елементи перекриттів рекомендовано проектувати нерозрізними, багатoelementними, надійно закріпленими до опор; передбачати у каркасі додаткові в'язі, які можуть сприймати і перерозподіляти, знешкоджувати аварійні дії. З'єднання і елементи слід улаштувати із контрольованими місцями утворення шарнірів пластичності у разі аварій. Рекомендовано застосовувати комбіновані несучі системи з улаштуванням сталезалізобетонних пілонів у найбільш небезпечних для прогресуючого руйнування зонах; надавати перевагу конструктивним рішенням перекриттів і покриттів у вигляді нерозрізних монолітних плит по профільованому настилу розмірами на весь поверх, що спільно (композитно) працюють зі сталевими балками за допомогою спеціальних упорів. Слід резервувати надійність, забезпечувати багатозв'язність систем.

Для зниження тиску повітряної ВУХ у місцях улаштування просвітів доцільно застосовувати частково-проникні екрани (ЧПЕ) та спеціальні пристрої.

Захист ОКІ за допомогою ЧПЕ. Як було зазначено вище, у разі обтікання ВУХ малої перешкоди, за нею утворюється область, де тиск нижче, ніж у падаючої хвилі. Але вже на невеликій відстані за перешкодою фронт ВУХ знову сходиться і тиск відновлюється. Тому невелика перешкода (низька стінка, мішки з піском тощо) може забезпечити захист від ВУХ тільки безпосередньо за нею. Найкращим рішенням є суцільне закриття контуру споруди. Проте, якщо просвітів (проходів, технологічних отворів тощо) неможливо уникнути, у них можна застосовувати захисні ЧПЕ. Таке рішення дозволяє зменшити тиск та імпульс ВУХ, термічну дію вибуху та запобігти влученню уламків для негерметичних споруд [10].

Наразі для військового захисту техніки і споруд вже широко застосовують рознесену броню [14; 15]. Також широко використовуються

перфоровані екрани [16; 17]. Для захисту елементів ОКІ екрани із наскрізними просвітами не можуть бути застосовані, тому що залишають вірогідність осколкового ураження елемента ОКІ.

Отже, ЧПЕ має бути непроникним для уламків, але проникним для частини тиску ВУХ, зменшуючи його. ЧПЕ є найбільш ефективними для споруд, у яких технологічно обумовлена необхідність великих просвітів для самопливного провітрювання. За рахунок легкості та компактності їх можна застосувати, як стулки дверей та воріт.

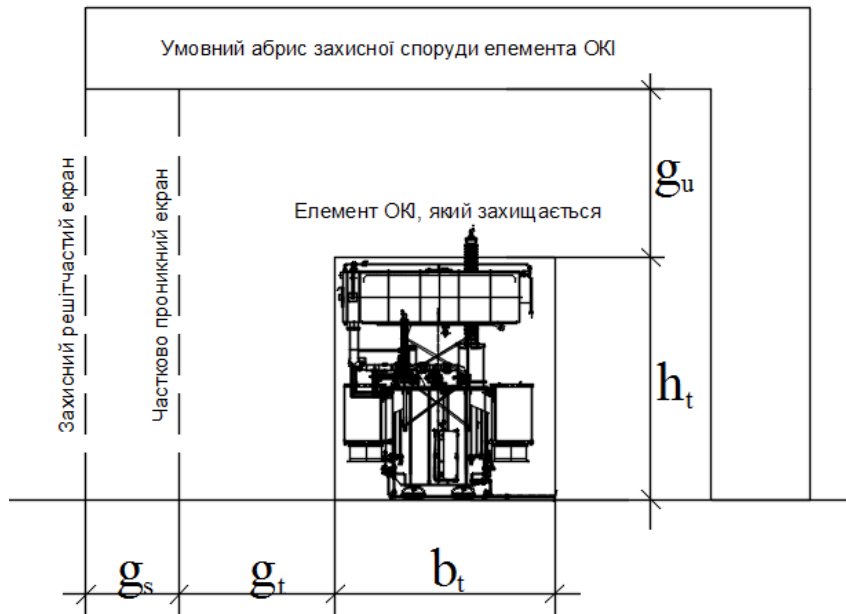


Рис. 5.9. Компонувальна схема захисту елемента ОКІ за допомогою ЧПЕ

На рис. 5.9 схематично показано модель споруди другого рівня інженерного захисту.

Перший захисний предетонаційний екран призначений для зупинки і подальшого руйнування або передчасної ініціації БЧ БпЛА. В резерв надійності та з огляду на невизначеність цей екран не враховується як такий, що зменшує тиск ВУХ чи затримує уламки.

Другий екран – частково проникний для ВУХ, проте має зменшити її тиск, а також затримати уламки.

З метою економічності у разі застосування ЧПЕ можливо використати резистентні властивості елементів ОКІ, тобто піковий тиск p_u , який вони здатні витримувати без повного руйнування [10], табл. 5.8.

Додаткові, більш детальні дані щодо будівель, містяться у нормах США [19], витяги із яких надані у табл. 5.9.

ОКІ енергетичної галузі є комплексними, з великою номенклатурою різноманітних будівель, споруд, елементів та устаткування. Якщо брати за критичний елемент електротрансформатори, які є однією із найбільш вірогідних мішеней противника, пікове значення надлишкового тиску для них становить $p_u = 70$ кПа.

Таблиця 5.8
Резистентні властивості елементів ОКІ

Устаткування, апарати, конструкційні елементи будівель та споруд	Пікове значення надлишкового тиску p_u , кПа
Щогли, антени, блискавковідводи, високовольтні лінії	35
Повітряні стовпи електромережі та зв'язку	50
Естакади для трубопроводів металеві	60
Естакади для трубопроводів залізобетонні	70
Естакади для електросилових ліній	50
Естакади для кабелів, дротів	35
Градирні залізобетонні	60
Димарі цегляні та залізобетонні	60
Димарі металеві	52
Ємності для зберігання рідин циліндричні	31
Ємності для зберігання рідин сферичні	90
Трубопроводи підземні	200
Трубопроводи наземні (зовнішні)	60
Кабельні канали в ґрунті	100
Повітропроводи, підйомно-транспортне обладнання	35
Електродвигуни	170
Щити електричні. Знижувальні трансформатори	70
Автоматика та обчислювальна техніка	15,4
Автоматика та обладнання пожежогасіння	40
Перегородки та покрівля цегляних будівель	15,4
Перегородки та покрівля залізобетонних будівель	17
Крівля м'яка	15,4
Перекриття промислових цегляних будівель	28
Перекриття промислових будівель зі сталевим та залізобетонним каркасом	30
Перекриття промислових будівель з масивними стінами	42
Підлоги	28
Стіни шлакоблочних будівель	22
Стіни дерев'яних будівель	28
Стіни цегляних будівель в 1.5 цегли	25
Стіни цегляних будівель в 2 цегли	45
Стіни цегляних будівель в 2.5 цегли	53
Фундаменти стрічкові житлових будинків	400
Фундаменти із замоноліченими колонами каркасу	215
Сходи	28
Оздоблювальні та інші роботи	15,4
Теплоізоляція трубопроводів	20
Механізми відкривання отворів	7
Скління з шибками понад 1×1 м	3,5
Скління з шибками менш ніж 1×1 м	7
Внутрішні роботи сантехнічні	28
Внутрішні роботи електротехнічні	15,4
Планування майданчика, покриття	400

Кожен ЧПЕ зменшує тиск ВУХ на шляху її розповсюдження на різницю Δp_i . Отже, основна умова неруйнування елемента ОКІ під час використання ЧПЕ може бути записана у вигляді нерівності:

$$\Delta p_f - \sum_{i=1}^k \Delta p_i - \Delta p_{gt} \leq p_u, \quad (5.13)$$

де p_f – початковий тиск на ЧПЕ з боку вибуху,

k – кількість ЧПЕ (зазвичай один або два).

Таблиця 5.9

Пікове значення надлишкового тиску

Граничний стан елемента	Початок пошкодження, p_d кПа	Відмова, p_u кПа
Блок наддуву сходів	12,76..15,86	19,1..24,06
Пожежні двері	8,07	12,13
Двері ліфтів	14,48	22,75
Контрольна панель пожежної сигналізації	2,34	3,72
Люмінесцентних ламп	-	6,27
Система повітроводів	0.008...1,24	0.12...1,86
Аварійний генератор	45,30	57,57
Система димосигналізації	45,30	57,57
Система сприкнклерного пожежогасіння	0,76	1,31
Вікна	Заклинка 6,89	Руйнування 10,34

Надлишковий піковий тиск на фронті ВУХ без перешкод дорівнює [20]:

$$\Delta p_f = \left(\frac{0.92}{\bar{R}} + \frac{3.5}{\bar{R}^2} + \frac{10.6}{\bar{R}^3} \right) \text{ при } 1.2 \leq \bar{R} \leq 17.8; \quad (5.14)$$

$$\Delta p_f = 4.2\bar{R}^{-1.45} \text{ при } 17.8 \leq \bar{R} \leq 1000. \quad (5.15)$$

де $\bar{R}$ – приведена відстань:

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{Q_{ef}}} \quad (5.16)$$

де R – віднесення точки вибуху від досліджуваного об'єкта, ефективна маса $Q_{ef} = (1 - \varepsilon)\alpha M_{ex}$,

ε – частка енергії вибуху, що витрачається на утворення воронки (для скельних порід $\varepsilon = 0,05$; для м'яких ґрунтів $\varepsilon = 0,2$; якщо вибух відбувся у повітрі без утворення воронки $\varepsilon = 0$);

α – відношення питомої енергії вибуху ВР до питомої енергії тротилу (ТНТ).

У цьому дослідженні розглядаємо повітряний вибух, так як в гіршому випадку БПЛА влучає посередині затримувального екрану.

Δp_{gt} – падіння тиску, яке відбувається у повітряному проміжку між ЧПЕ та власне елементом ОКІ, так як екран не розташовується впритул, а завжди має технологічний зазор.

Під час детонаційного вибуху ВР максимальний надлишковий піковий тиск одразу за екраном на відстані R від центру вибуху обчислюють за емпіричною формулою [10]

$$\Delta p = 1410 \bar{R}^{-1.66} \left(\frac{R}{x} \right) \alpha^{0.64} \quad (5.17)$$

де $\bar{R}$ – приведена відстань, яку обчислюють за формулою вище;

x – характерний розмір екрана (його можна прийняти рівним квадратному кореню з площі);

α – коефіцієнт проникності екрану.

Формула (5.17) справедлива, якщо коефіцієнти перебувають у таких межах:

$$0,01 \leq \alpha \leq 0,13; 0,69 \leq (R/x) \leq 4,55; 1,16 \leq R \leq 8,45 \text{ м/кг}^{1/3}. \quad (5.18)$$

Обмеження із застосування формул також є активними обмеженнями моделі.

ЧПЕ обладнують зазвичай із щільно розташованих металевих конструкцій, у яких залишають проміжки для проходження ВУХ. У цій роботі розглядаються ЧПЕ із вертикальних, послідовно розташованих кутиків, які найбільш економічні та прості у виготовленні (рис. 5.10).

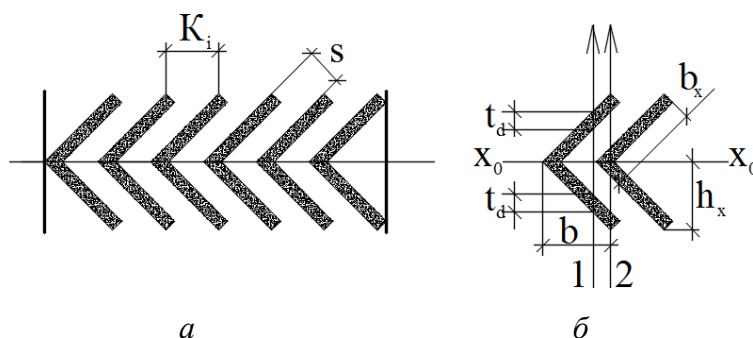


Рис. 5.10. Схема ЧПЕ із сталевих кутиків: *а* – геометрична компоновка перерізу екрану, *б* – схема можливого проникнення уламків

Для схеми на рис. 5.10, *а*, коефіцієнт проникнення $\alpha = \frac{A_s}{A_w}$, де A_w – площа стіни, у якій вмонтовано екран; A_s – площа екрануючих елементів. Якщо екран одинарний, то коефіцієнт його проникнення α дорівнює відношенню проникної поверхні до поверхні стіни або покрівлі, в якій він встановлений. У ході послідовної установки k екранів із проникненням α_i , сумарний коефіцієнт проникнення α_Σ вираховують за формулою $\alpha_\Sigma = \sum_{i=1}^k \alpha_i$. У цьому дослідженні розглядається один екран, як технологічно найпростіший варіант.

Іншим фактором ураження є осколки від вибуху БЧ ЗПН. Швидкість розльоту осколків під час вибуху [21] може бути обчислена за формулою (5.10), а маса металу корпусу бойової частини “Shahed-136” та ефективна маса ВР у перерахунку на тротильовий еквівалент – відомі. Коефіцієнт φ ,

який враховує форму БЧ, дорівнює 3,33 для сферичної, 4 – для циліндричної та 6 – для плоскої форми. Вважаємо, що БЧ БпЛА має циліндричну форму. Коефіцієнт $\varphi_1 = 0,8..0,9$ враховує втрати енергії, яка йде на руйнування оболонки або на прорив продуктів детонації у проміжок і яка передається осколкам у момент розльоту; може бути прийнято 0,9, так як оболонка БЧ нетовста (біля 7 мм, див. вище). Параметр D – швидкість детонації ВР, $D = 340\sqrt{1+8.3\Delta p_f}$. Швидкість руху БпЛА у швидкості руху осколків у фронтальній ВУХ можна не враховувати, так як БпЛА рухається повільно відносно осколків, а момент вибуху взагалі відповідає фактичній зупинці планера на момент ініціації заряду під час удару з перешкодою. Залежно від швидкості зіткнення матеріали виявляють різні свої властивості (табл. 5.10) [21].

Таблиця 5.10

Властивості (поведінка) матеріалу залежно від швидкості зіткнення

Швидкість зіткнення, м/с	Властивості (поведінка) матеріалу
<50	Переважають пружні деформації. Можлива поява зон локалізації
50...500	Переважають пластичні деформації
500...1000	Прояв в'язко-пластичних і в'язких властивостей. Міцність матеріалу лишається істотною
1000...3000	Гідродинамічна поведінка твердих тіл. Визначальною є густина
3000...12000	Необхідне врахування стисливості матеріалів
>12 000	Випаровування матеріалу

Для обраних умов $D = 2000...3000$ м/с; $V_p = 1000...2000$ м/с. Отже, визначальною буде густина матеріалів. Потрібно з'ясувати проникну здатність осколків. Як було вищезазначено, для надзвукових швидкостей влучання, коли швидкість боєприпасу V_c перевищує швидкість звуку матеріалу перешкоди, глибина t_p проникнення боєприпасу в матеріал перешкоди обчислюється за формулою (5.11) [6].

Осколки під час руйнування БпЛА імовірно не будуть мати строгих форм. Проте при першому наближенні може бути прийнята аналогія боєприпасу з конічною головною частиною і кутом конусності $\mu = 45^\circ$. Тоді $\chi_0 = 0,5$. ρ_{01} , ρ_{02} – відповідно густина матеріалу перешкоди та конструкції боєприпасу (БЧ БпЛА). Густина матеріалу перешкоди – сталі кутиків, $\rho_{02} = 7850$ кг/м³. H – динамічна твердість матеріалу перешкоди, наближено можна прийняти як твердість сталі 09Г2С, $H = 450..490$ МПа, усереднено 470 МПа. Параметр l_o – довжина боєприпасу. Із дослідження місць влучань, осколки БЧ “Shahed-136” можуть сягати до 9 см завдовжки (див. розділ 2 вище). Проте за підрахунками проєктування боєприпасів може бути наближено прийнято, що усереднена довжина осколків становить до 3 см, $l_o = 0,03$ м.

Найгіршим є влучення осколка в екран по нормалі до поверхні перешкоди. Прийняте компоновання ЧПЕ із кутиків (рис. 5.9, б) зумовлює перетин осколком мінімум двох полиць кутика, із сумарною товщиною $2t_d = 2\sqrt{2}t = 2.83t$, де t – товщина полиці кутика. Отже, умова непробиття двох екранів 1 та 2 осколком під час вибуху БЧ БПЛА матиме вигляд:

$$2.83(t_1 + t_2) \geq t_p \quad (5.19)$$

Геометричні характеристики прокатних кутиків в цілому можуть бути прийняті за [22].

Крок елементів на екрані K_i за умов непроникнення осколків повинен бути не більше, аніж $b - t_d$, але не менше, ніж 5 см за технологічних умов зварювання [23]: $K_i \leq (b - t_d)$; $K_i \geq 5 \text{ см}$.

Кожен екран повинен витримувати на міцність ту різницю тиску, на яку зменшується ВУХ. З істотним резервом надійності піковий тиск приймемо як квазістатичний граничний при аварійному сполученні. Оскільки кутик за схемою на рис. 5.9 у екрані розташовується за нетривіальним положенням відносно головних геометричних осей перерізу, було обчислено моменти опору для сортаменту ДСТУ 2251:2018 за формулою

$$W_{x0} = \frac{I_{x0}}{h_x} = \frac{I_{x0}}{0.71b_x},$$

де b_x – ширина полицки кутика.

Також було обчислено статичні моменти за формулою

$$S_{x0} = \frac{A}{h_x}$$

ВУХ діє на проєкцію кожного кутика, ширина якої $d_x = 0.71b_x$. Тоді лінійно розподілене навантаження на один кутик становить $p_{x0} = \Delta p \cdot b$.

Згинальний момент у кутику при шарнірному закріпленні рівний $M_{x0} = \frac{p_{x0}L^2}{8}$,

поперечна сила рівна $Q_{x0} = \frac{p_{x0}L}{2}$, де L – висота елемента екрану, або ж відстань між точками закріплення. Умови міцності сталевих кутиків можуть бути взяті за згином і поперечною силою як для елемента першого класу перерізу згідно з [23], розглядається тільки пружна робота. Таким чином, умовою неруйнування кожного елемента екрана є дотримання нерівностей:

$$\frac{M_{x0}}{W_{x0}R_y\gamma_c} \leq 1; \quad \frac{Q_{x0}S_{x0}}{I_{x0}tR_s\gamma_c} \leq 1 \quad (5.20)$$

де I_{x0} – момент інерції;

γ_c – коефіцієнт умов роботи;

R_y – розрахунковий опір сталі за межею текучості на згин;

R_s – відповідно розрахунковий опір сталі за межею текучості на зсув.

На підставі методики розрахунку ЧПЕ можливо визначити їх оптимальні параметри для різних вихідних умов. Для цього слід вирішити

задачу оптимального проектування ЧПЕ. При цьому серед усіх альтернатив виконується вибір оптимальної за вирішувальним правилом із множини альтернатив S , за яку може бути прийнято сортамент рівнобічних прокатних кутиків:

$$r : S^* = \arg \min_{x \in S} K_{j^*}(q_1(x), q_2(x), \dots, q_p(x)). \quad (5.21)$$

Цільова функція на початковому етапі може бути записана у вираженні маси елементів екрана на 1 м погонний:

$$m^* = \sum_{i=1}^{k1} \rho_i L_i n_i \rightarrow \min. \quad (5.22)$$

Умови неруйнування елемента ОКІ, обмеження застосування формул, неруйнування екранів та їх непроникності до осколків – утворюють систему активних обмежень математичної моделі захисту елементів ОКІ за допомогою ЧПЕ. Така задача належить до задач дискретної оптимізації сильно-нелінійних, частково сепарабельних функцій [24; 25]. Для подібного класу задач може бути застосований метод еволюційного пошуку. У даному випадку застосуємо солвер (комп'ютерний математичний апарат-вирішувач), розроблений компанією Frontline Systems, Inc. (США) для середовища Microsoft Excel, який використовує різноманітні генетичні алгоритми та методи локального пошуку [26].

Загальний габарит системи захисту регламентують параметрами елемента ОКІ, вважаємо, що максимальна відстань від предетонаційної перешкоди до ЧПЕ становить не більше 7 м, що відповідає практичним обмеженням технології. Нижня межа виявилася 3...4 м в результаті підбору перерізів. Мінімальний технологічний зазор від елемента до ЧПЕ зсередини беремо 3...5 м, виходячи із усереднених даних, наданих операторами об'єктів енергетики. Сталь кутиків беремо 09Г2С (С345). Стандартний розмір просвіту, який заповнений ЧПЕ, маємо квадратний, із ансамблем розмірів з кроком 1 м: 3×3, 4×4, 5×5, 6×6, 7×7 м.

Перемінним параметром у алгоритмічній цільовій функції є номер перерізу кутика ЧПЕ. Результати пошуку оптимальних вирішень для визначених умов зображені у табл. 5.11 та на рис. 5.11.

Висновки та обговорення. Як видно із табл. 5.11 та графіка рис. 5.11, для обраних вихідних параметрів оптимальними конструктивними рішеннями є профілі із достатньо вузької допустимої області сортаменту. Вирішальними під час підбору є переважно фактори затримання осколків та кінцевий граничний тиск на елемент ОКІ. Тобто міцність профілів має переважно менше значення, аніж геометрія профілю та віддалі від предетонаційного екрана до ЧПЕ, і від ЧПЕ – до елемента ОКІ.

Таблиця 5.11

Результати підбору перерізів елементів ЧПЕ

№	Визначальний фактор	Відстань від ЧПЕ до елемента, м	Залишк. тиск на елемент ОКІ, кПа	Відстань від вибуху БпЛА до ЧПЕ, м	Підібраний переріз	Розм. екрана, м	Маса екрана на 1 м ширини, кг
1	Затримання осколків	3	53,78	7	140×140×11	4×4	657,72
	Тиск		64,06	6	140×140×12		892,5
	Тиск		68,68	5	180×180×16		1044,96
				4	За межами сортаменту		
2	Затримання осколків	4	49,62	7	140×140×11	4×4	657,72
	Затр. осколків, тиск		58,13	6	140×140×12		714
	Тиск		69,24	5	140×140×14		825,72
	Затр. осколків, тиск		67,88	4	220×220×16		1076,6
				3	За межами сортаменту		
3	Затримання осколків	4	45,86	7	140×140×11	5×5	822,15
	Затримання осколків		53,72	6	140×140×12		956,98
	Затр. осколків, тиск		63,99	5	140×140×14		1032,15
	Затр. осколків, тиск		63,91	4	220×220×16		1345,75
				3	За межами сортаменту		
	4	Затримання осколків	5	42,16	7	140×140×11	5×5
Затримання осколків		48,71		6	140×140×12	892,5	
Затр. осколків, тиск		57,06		5	140×140×14	1032,15	
Затр. осколків, тиск		67,96		4	140×140×16	1169,7	
Затр. осколків, тиск		64,35		3	250×250×18	1721,5	
				2	За межами сортаменту		
5	Затримання осколків	5	40,26	7	140×140×11	6×6	986,58
	Затримання осколків		46,52	6	140×140×12		1071
	Затр. осколків, тиск		54,49	5	140×140×14		1238,58
	Затр. осколків, тиск		64,90	4	140×140×16		1403,64
	Затр. осколків, тиск		67,34	3	200×200×18		1958,4
				2	За межами сортаменту		
6	Затримання осколків	5	38,70	7	140×140×11	7×7	1151,01
	Затримання осколків		44,72	6	140×140×12		1249,5
	Затримання осколків		52,38	5	140×140×14		1445,01
	Затр. осколків, тиск		62,40	4	140×140×16		1637,58
	Затр. осколків, тиск		67,51	3	180×180×18		2992,91

Отримана таблиця дає змогу підібрати оптимальне вирішення ЧПЕ для захисту елементів ОКІ із граничним значенням допустимого пікового тиску $p_u = 70$ кПа (або нижче, але рішення вже буде допустимим, а не оптимальним). За відсутності якогось із типорозмірів кутикових профілів на металобазах у ході реалізації рішень вони можуть бути виготовлені зварними із сталевих листів.

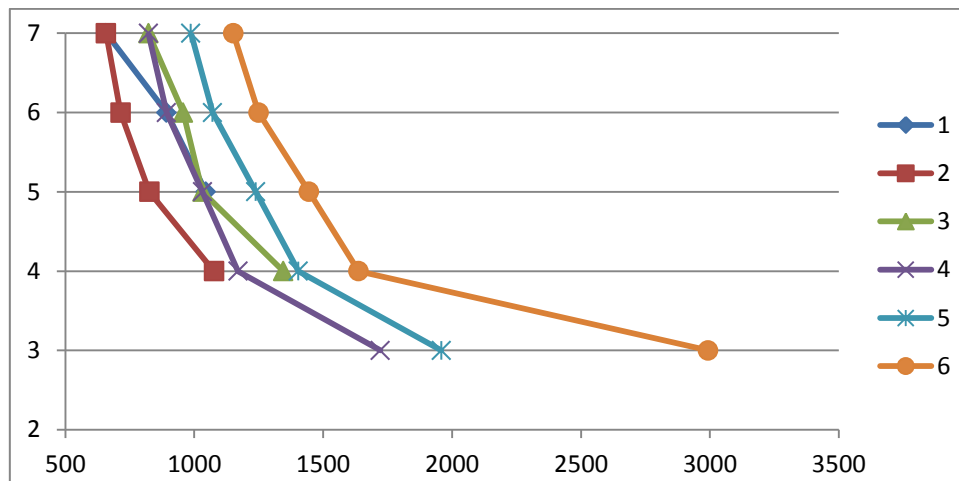


Рис. 5.11. Графічне зображення результатів дискретного пошуку оптимального рішення у досліджуваній області (номери відповідні першому стовпчику із табл. 5.11)

У цій роботі розглянутий випадок, коли ЧПЕ є частиною захисної споруди у місці великого просвіту, наприклад, для улаштування воріт або для провітрювання. Проте окремо надалі можуть бути розглянуті і споруди, які повністю складаються із металоконструкцій ЧПЕ. Таке рішення є доцільним насамперед для невеликих за габаритами елементів ОКІ. Для значних за розмірами елементів ОКІ необхідне улаштування самостійних тримальних конструкцій, на яких будуть закріплені екрани (каркасів, рам тощо). Також слід враховувати, що проведені вище розрахунки чинні тільки за тандемного використання екрана-затримувача БпЛА (який зазвичай виробляються у вигляді решітчастих конструкцій із двотаврів, труб або канатів, див. розділ 2), та, власне, ЧПЕ.

Також значення має тиск, який здатен витримувати самостійно елемент ОКІ без порушення функціональності. Чутливі елементи варто захищати не ЧПЕ, а суцільними спорудами типу “Шелтер”, або за допомогою заглибленого, підземного розташування, тобто захисту третього рівня.

ЧПЕ мають переваги через легкість, технологічність та швидкість улаштування із готових металевих конструкцій. Залежно від тиску, який може витримувати власне елемент ОКІ (або з урахуванням можливості знаходження людей), буде змінюватися конфігурація ЧПЕ. Отримані результати, як і дані щодо стійкості елементів ОКІ – потребують експериментальної перевірки за допомогою чисельних або/та натурних експериментів, що важливо для подальших досліджень.

РОЗДІЛ 6. ОЦІНЮВАННЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНЖЕНЕРНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ

6.1. Техніко-економічне порівняння варіантів і прийняття рішень про вибір інженерного захисту для елементів об'єктів критичної інфраструктури

Вибір раціонального або оптимального варіанта захисту ОКІ від ЗПН є складною задачею перед особою, яка приймає рішення. Цей вибір зазвичай приймають за умов обмеженого часу, ресурсів та інформації. Основні питання, які можуть виникати у ході вибору рішень **інженерного захисту для елементів ОКІ від факторів ураження ЗПН**, такі:

- Який максимальний тип захисту для цього елемента ОКІ можливо збудувати при наявних ресурсах за найменший час?
- Який тип захисту буде вигіднішим з урахуванням ризиків для цього елемента ОКІ?
- Як мінімізувати втрати від ураження елементів на ОКІ від ЗПН за допомогою комбінації систем захисту?

Дві крайнощі, які можна зустріти під час прийняття рішення у відповідальних за це осіб – це намагання максимально захистити всі елементи, або ірраціональне намагання мінімізувати будь-який захист (недовіра до інженерних систем та покладання всієї відповідальності за захист ОКІ на системи ППО). Безперечно, хоча б мінімальний захист ліпше, ніж відсутність захисту взагалі. Проте гірше, ніж небезпека – тільки ілюзія безпеки. Отже, перед особою, яка приймає рішення, стоїть задача кардинального вибору найкращого варіанту захисту із можливих, з урахуванням можливих втрат від ураження елементів ОКІ. При цьому дієвими інструментами виявляються методики керування ризиками та оцінювання життєвого циклу, що дозволяють визначити прийнятне рішення і довести його ефективність до особи, яка приймає рішення.

Керування ризиком – процес прийняття рішень і здійснення заходів, спрямованих на зміну ризику [1]. Механізми керування ризиком – це сукупність інструментів, методів, форм та засобів взаємодії суб'єктів керування ризиками для розроблення та реалізації управлінських рішень, спрямованих на попередження настання ризиків, зменшення і подолання наслідків їх впливу. **Ризик** – ймовірність виникнення небажаної події, помножена на вартість збитків від її настання [2].

Виконання кількісного аналізу ризиків допомагає особам, які приймають рішення, розробляти стратегії економічно ефективного вдосконалення систем [3]. Це передбачає виявлення слабких місць системи та їх відповідне ранжування [4], а адекватні дані дають змогу особі, яка приймає рішення систематично аналізувати ризики через ймовірності невдачі. Цей крок є важливим і має два основні аспекти: оцінювання ризику

та управління ризиком. Оцінювання ризику зосереджено на виявленні небезпек і кількісному визначенні рівня ризику [5]. З іншого боку, управління ризиками передбачає вдосконалення системи для мінімізації виявлених ризиків [6].

З погляду системного аналізу, ОКІ як складні системи, елементи економіки країни, повинні володіти статичною і динамічною стійкістю. Статичну економічну стійкість визначають як здатність системи продовжувати функціонувати після шоку, тоді як динамічна економічна стійкість – це швидкість, з якою система відновлюється після шоку для досягнення бажаного стану [6].

Оцінювання збитків можна проводити залежно від джерел даних кількома методами.

1. Прямий метод. Витрати можуть бути встановлені за допомогою опитування операторів ОКІ, які зробили розрахунки втрат на основі заміщення знищених елементів і кошторисної вартості їх ремонту та інших збитків. Такий метод є найточнішим щодо кожного конкретного об'єкта, проте за допомогою нього складно оцінити непрямі збитки та витрати ЖЦ за межами ОКІ.

2. Метод аналогів має найбільшу точність для подібних об'єктів, які були вже відновлені після ураження ЗПН противника, і є їх повна кошторисна кінцева вартість за фактом відновлення. В той же час, непрямі витрати, як і при прямому методі – нечасто є можливість встановити для аналогів навіть постфактум. Також специфічність та унікальність пошкоджень ОКІ внаслідок ураження ЗПН противника зумовлюють те, що точні аналоги знайти вкрай важко. До того ж відновлення відбувається часто нерівномірно і у різні терміни, із застосуванням різного обладнання, що дає значний діапазон значень витрат.

3. Метод чисельного моделювання дозволяє визначити вартість на основі теоретичних обчислень, які узагальнюють статистику пошкоджень, та необхідні ресурси для їх усунення. Модель може включати багато факторів, ураховуючи їх через спеціальні коефіцієнти тощо. Основною перевагою чисельного методу є можливість змоделювати опосередковані збитки та витрати ЖЦ за межами ОКІ. Недоліком такого методу є знижена можливість урахування високомінливих факторів, які впливають на вартість ЖЦ споруд та обладнання ОКІ у ході відновлення.

На практиці часто застосовують комбінований підхід, коли частину показників беруть за доступними даними, а частину – за аналогами або в результаті моделювання. Так само можливо проводити оцінювання ймовірностей для визначення і керування ризиками.

Життєвий цикл об'єкта будівництва (building life cycle) – це послідовні та взаємопов'язані стадії системи об'єкта будівництва від видобутку природних ресурсів, використання сировини до їх кінцевого повернення у довкілля [7]. Кожна будівля як система проходить ланцюжок: *сировина – матеріал – виріб – елемент – конструкція – будівля*, яку згодом

піддають реновації, або заміщують, з подальшим розбиранням та утилізацією [8]. Аварійна подія у ЖЦ призводить до додаткових викидів і непередбачених залучень ресурсів, знижує капітальність споруди (рис. 6.1).



Рис.6.1. Узагальнений життєвий цикл будівлі з урахуванням можливої аварійної події та відновлення

Документ ДСТУ ISO 14040 [9] визначає кілька фаз оцінювання життєвого циклу (Life Cycle Analysis, LCA, ОЖЦ):

Фаза I. Визначання мети і сфери застосування (Goal and scope definition);

Фаза II. Аналізування інвентаризації життєвого циклу (Life cycle inventory, LCI, ІЖЦ);

Фаза III. Оцінювання впливу життєвого циклу (Life cycle impact assessment, LCIA, ОВЖЦ);

Фаза IV. Інтерпретування життєвого циклу (Life cycle interpretation).

Аналіз життєвого циклу є складовою більш загального поняття “повного аналізу життєвого циклу будівлі або споруди” (**whole-building life-cycle assessment, WBLCA**). Окремо також визначають поняття “керування життєвим циклом” (Life Cycle Management, LCM) – це керування продукційною системою для мінімізації екологічних і соціально-економічних навантажень, пов’язаних з продуктом або асортиментом продукції, упродовж всього його ЖЦ та ланцюжка створення вартості.

Ураження, як аварійна подія у ЖЦ ОКІ, призводить до часткової або повної зупинки його функціонування, потребує часу і ресурсів на відновлення, створює викиди у довкілля, знижує загальну надійність об’єкта унаслідок прихованих дефектів, які залишаються від уражень ЗПН навіть після відновлення, включно із ефектами повзучості, ризиком

відтермінованого вибуху не знайдених БЧ тощо. Як приклад можна навести випадок котлотурбінного цеху на одній ТЕС у Донецькій області, що неодноразово зазнавала ворожих обстрілів, і відповідно накопичились пошкодження, які призвели до раптового обвалення конструкцій даху під час експлуатації. Через цю подію зазначений ОКІ зазнав прямих і непрямих втрат – загибель і травмування персоналу, пошкодження обладнання, аварійне відключення енергоблоків [10].

Один із основних ДБН В.1.2-14 [11] регламентує, що встановлена надійність має бути забезпечена на всіх етапах **ЖЦ об'єкта**, розкриваючи таку його етапність: вишукування і проектування; виготовлення, транспортування та зберігання будівельних виробів; освоєння будівельного майданчика та зведення об'єкта, приймання об'єкта в експлуатацію; використання об'єкта за призначенням упродовж встановленого терміну експлуатації, оцінювання технічного стану, поточні та капітальні ремонти; реконструкція та подальше використання у нових умовах; ліквідація/демонтаж об'єкта. Ця важлива методологічна структура має в подальшому поширюватись не тільки на надійність об'єктів, а й на оцінювання складових ЖЦ.

Рух коштів під час експлуатації ОКІ, як і будь-якого іншого об'єкта економіки, характеризується складними взаємозв'язками та циклами (рис. 6.2). Аварійна подія, така як пошкодження елементів ОКІ унаслідок факторів ураження ЗПН – призводить до різкого зниження прибутків від ОКІ та зростання витрат на відновлення його функціоналу.

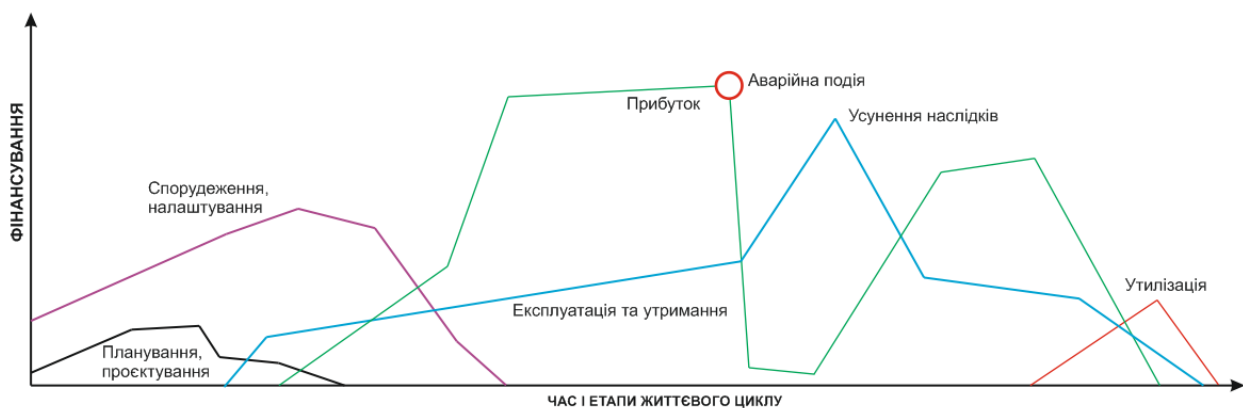


Рис. 6.2. Графік витрат і прибутків упродовж життєвого циклу об'єкта з урахуванням аварійної події

Основним інтегральним критерієм, до якого можна звести вимірність ощадності на цьому етапі розвитку нашої країни та цивілізації в цілому, є грошовий еквівалент. Тому комплексне оцінювання параметрів ЖЦ проекту включає як **екологічний (LCA)**, так і **економічний аналіз (LCC)**. Для всієї будівлі також застосовують WBLSA, див. вище. Зазвичай найскладнішою для екологічного аналізу є фаза експлуатації, а для економічного – навпаки,

фаза експлуатації є найважливішою. У цій монографії розглядається тільки економічне оцінювання ЖЦ.

Економічне оцінювання вартості життєвого циклу (Life Cycle Costing, LCC або ж Life Cycle Costing Analysis, LCCA) може здійснюватися на різних етапах ЖЦ проєкту – на загальному рівні, використовуючи середньостатистичні показники чи показники для конкретного типу будівництва (їх іноді називають “параметричними оцінками”), або ж на детальному рівні, на основі конкретного оцінювання або прогнозів виконання компонентів та технічного обслуговування.

Уперше методика оцінювання вартості ЖЦ була розроблена Міністерством оборони США (Department of Defense, DOD). Вимоги щодо урахування вартості ЖЦ в державних проєктах розпочалися з середини 1960-х років для Допоміжного секретаріату оборони з устаткування і логістики США (Assistant Secretary of Defense for Installations and Logistics). Це призвело до низки вказівок щодо закупівель, а потім до Директиви 5000.1 від DOD США [15], що встановлювала вимоги до витрат на ЖЦ для всіх основних закупівель оборонних систем. У 1978 році Конгрес США прийняв Закон про національну політику енергозбереження, який регламентує для кожної нової федеральної будівлі економічну ефективність ЖЦ [16]. Сьогодні всі федеральні відомства США зобов’язані використовувати аналіз витрат ЖЦ під час оцінювання інвестиційних рішень.

Зазвичай початковий орієнтовний аналіз вартості ЖЦ (LCC) повинен базуватися на функціональній одиниці матеріалу – наприклад, на вартості конструктивного елемента балки, або на відносному показнику активу: наприклад, вартість інженерного захисту одного елементу ОКІ – трансформатора, вартість захисту на 1 МВ генерації електроенергії тощо. На більш пізніх етапах вартість ЖЦ може бути розрахована по кожному елементу з використанням інтегрованої структури LCC, що поліпшує точність оцінювання. Базове оцінювання LCC може бути удосконалено і розширено, але у будь-якому разі воно становить тільки основу для детального аналізу вартості ЖЦ.

Детальний аналіз вартості ЖЦ повинен ґрунтуватися на достатньо ґрунтовному описі та квантуванні всіх окремих компонентів об’єкта будівництва. При цьому слід ретельно перевіряти ефекти від усіх параметрів, щоб оцінити їх вплив на загальну вартість ЖЦ. Детальний аналіз може включати в себе складові ЖЦ для всіх виробів і їх компонентів. Детальна класифікація відповідних витрат включена в стандарт ISO 15686 [12]. Під час детального аналізу має бути визначена **вартість усіх змінних**. Це означає, що для кожної позиції вартості повинен бути визначений відповідний період часу, упродовж якого відбуваються чи повторюються витрати. Слід враховувати, що витрати можуть бути також фіксованими або змінними в часі. За основу для часових параметрів обрахунку грошових потоків слід брати графік реалізації ЖЦ об’єкта, складений на основі попереднього оцінювання. Через невизначеність, витрати зазвичай обчислюють у цінах,

приведених до дати аналізу, а не у цінах в майбутньому. Проте майбутні прогнозовані значення витрат на ЖЦ також можуть бути використані, якщо вони потрібні для звітності і чітко диференціюються у ній, при цьому вони мають бути розраховані максимально точно. Особливу увагу слід приділити найбільш значущим змінним витратам, які можна отримати за допомогою таких даних:

- прямих оцінок із відомостей щодо відомих витрат і вартості компонентів;
- аналізу архівних даних із типових рішень;
- моделей, що базуються на усереднених показниках;
- прогнозних уявлень про майбутні тенденції в галузі технологій та на ринку.

Економічний критерій вибору типу, форми, конструкцій тощо для захисної інженерної споруди ОКІ повинен бути всеосяжним і враховувати всі компоненти її ЖЦ, ґрунтуючись на принципі мінімізації його повної вартості. Склад вартості ЖЦ (LCC) будівлі або споруди є частиною вартості її повного життя (Whole Life Cycle Costing, WLCC) [12–14], рис. 6.3).

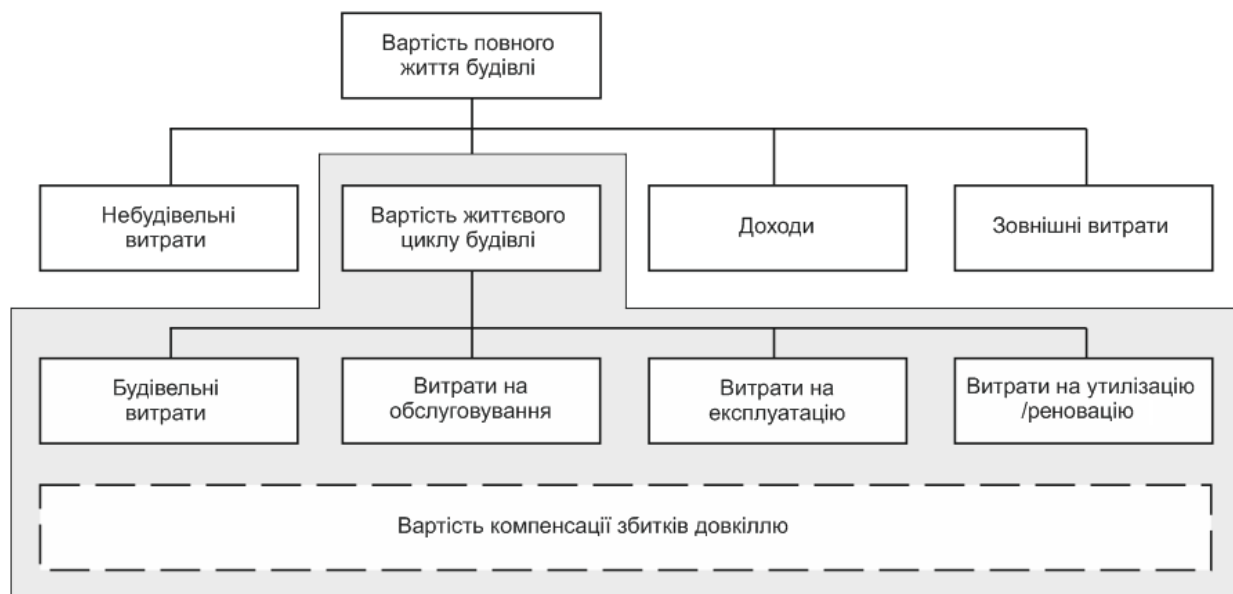


Рис. 6.3. Структура вартості повного життєвого циклу будівлі або споруди

Вартість ЖЦ формується із собівартості будівлі або споруди [17, 18], вартості її експлуатації та обслуговування і вартості завершення циклу – тобто реновації чи розбирання споруд утилізація її компонентів [19].

Оскільки для захисних споруд ОКІ головною функцією є мінімізація або недопущення дії тих чи інших факторів ураження ЗПН, для розрахунку вартості ЖЦ необхідне знання втрат від настання аварійних подій – пошкоджень елементів ОКІ. Із грудня 2022 року в Україні за ініціативою авторів цієї книги почалося збирання даних щодо розгорнутої статистики уражень ОКІ у вигляді чек-лістів. Зібрана статистика щодо уражень ОКІ всього за декілька місяців, але найбільш інтенсивного періоду регулярного нанесення ударів ЗПН, вже дає змогу зробити первинні висновки. Захист

першого рівня під час ураження від ракети не захищає елемент ОКІ, у більшості випадків спрацьовуючи частково (рис. 6.4). Під час ураження від БпЛА ефективність захисту першого рівня знижується ще більше (рис. 6.5).

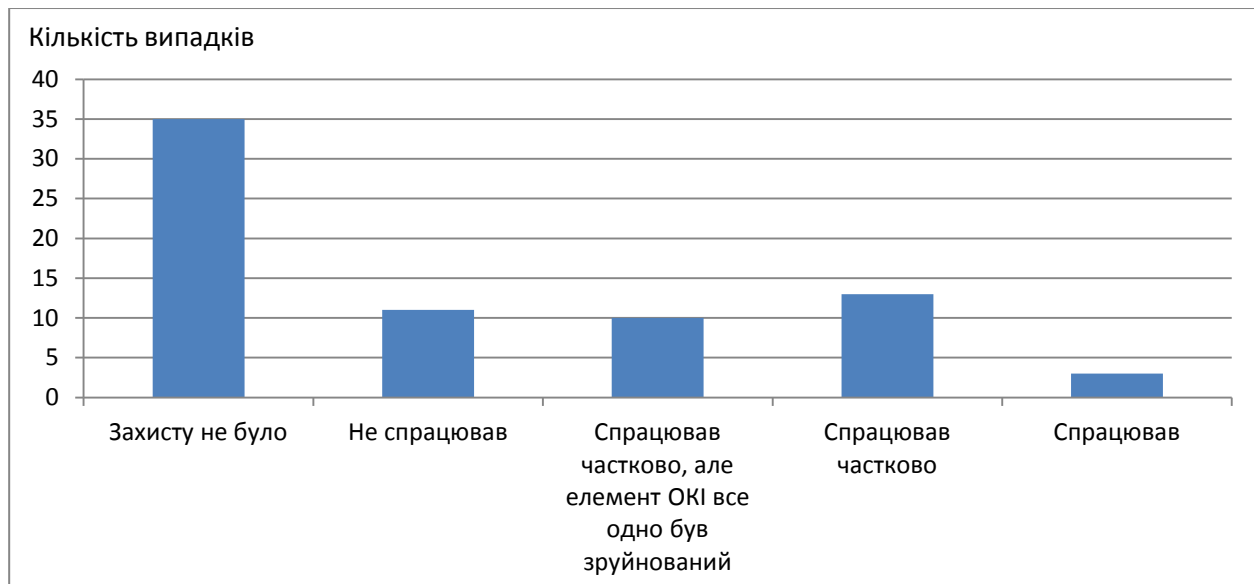


Рис. 6.4. Фактична статистика наявності та ефективності захисту під час ракетного ураження (без зазначення окремих типів ракет) грудень–лютий 2022–2023 рр., захисні споруди тільки першого рівня

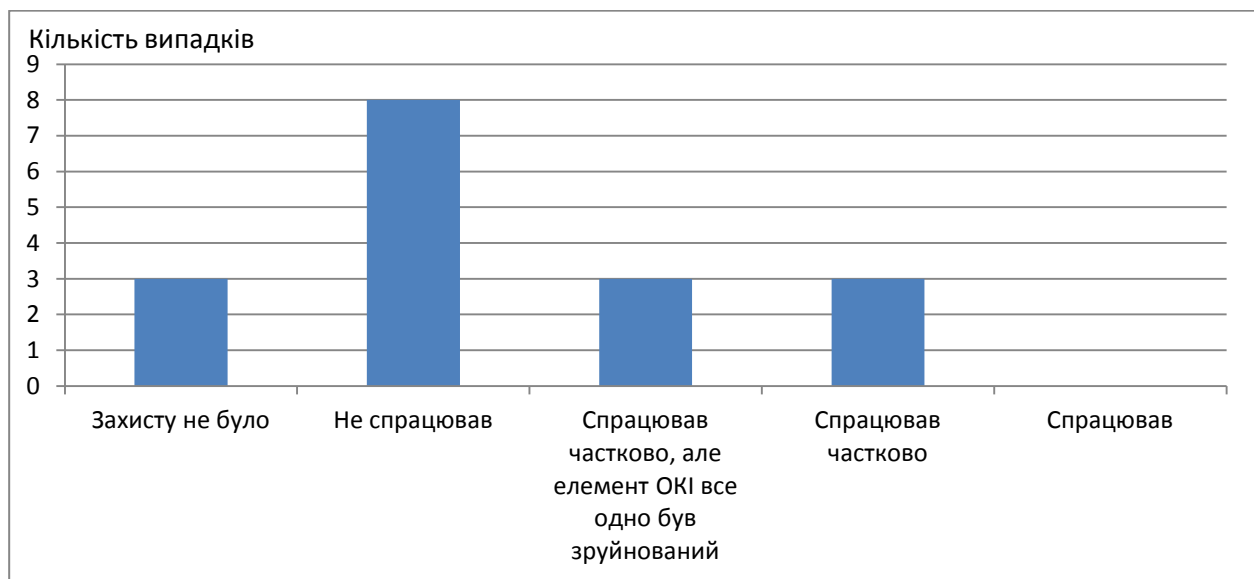


Рис.6.5. Фактична статистика наявності та ефективності захисту під час ураження БпЛА (без зазначення окремих типів БпЛА) грудень–лютий 2022–2023 рр., захисні споруди тільки першого рівня

Нижче наведена порівняльна табл. 6.1 факторів пошкодження елементів ОКІ унаслідок дії ЗПН згідно з зібраною статистикою.

Таблиця 6.1

Фактичні дані щодо наслідків пошкодження елементів ОКІ внаслідок атак ЗПН, отримані від операторів

Фактор	Ракети	БпЛА	Середнє значення
Середня вартість ремонту пошкоджень та заміщення обладнання, грн.	124758367	356253480	240505924
Середній прогнозний час повного відновлення ОКІ, діб	194	271,67	233
Середній відсоток падіння потужності, %	67,08	56,43	61,8
Середній час відновлення потужності, діб	13	51,69	64,7

Отже, пошкодження від влучання БпЛА втричі більші за вартістю відновлення і в півтора рази довші за часом, ніж при влучанні ракет. Як втрати оператори ОКІ надавали лише дані щодо заміщення і відновлення (ремонт) пошкодженого обладнання без урахування непрямих втрат.

Дані у вищенаведеній таблиці та графіках надано узагальнені з частковим, повним або відсутнім інженерним захистом першого рівня.



Рис. 6.6. Неспрацювання систем інженерного захисту першого рівня: знищення трансформатора після прямого влучання ракети рф, який забезпечував світло для 400 тисяч споживачів, захист із бігбегів зруйновано (а), знищення нафтопереробного вузла унаслідок прямого влучання “Шахіда-136” (б)

На час написання книги збирання статистики продовжується і після завершення побудови споруд другого і третього рівня захисту можливо буде при імовірних прямих та непрямих влучаннях ЗПН отримувати фактичні дані щодо ефективності усіх систем захисту згідно з концепцією “Країна-фортеця”, та за потреби, вдосконалювати і розвивати проєктні рішення.

Вибір оптимального конструктивного рішення захисної споруди на передпроектній стадії з урахуванням критеріїв ЖЦ є важливою та актуальною задачею, особливо в умовах впливу часових та фінансових факторів, якими обмежений проєктувальник, інвестор, будівельник та оператор ОКІ. Зазвичай вибір початкового варіанта споруди спирається на узагальнений досвід проєктування конкретного проєктувальника, а за

відсутності необхідних аналогів – на порівняння варіантів. Тому на першому рівні оптимізації будівельних конструкцій є варіантне проектування, коли розглядають кілька варіантів майбутньої конструкції, які порівнюють за певними критеріями, переважно за техніко-економічними показниками. Аналіз здійснюється шляхом осмислення особою, що приймає рішення (ОПР) відповідності параметрів кожного з варіантних рішень заданим у технічному завданні на проектування умовам або обмеженням, за кожним з критеріїв порівняння [20].

З точки зору вартості, задача вибору системи інженерного захисту для ОКІ може бути формалізована у вигляді вирішального правила співвідношення вартості забезпечення захисту C_p та можливих втрат від ураження елемента, який захищається E_c :

$$C_p = C_{IP} + C_{TS} < E_c = E_D + E_N \quad (6.1)$$

де C_{IP} – пряма приведена вартість, пов'язана із системою інженерного захисту;

C_{TS} – непряма вартість інженерного захисту, наприклад недоотриманий прибуток від контрольованої тимчасової зупинки обладнання для улаштування інженерного захисту тощо;

E_D – вартість прямих втрат від ураження і знищення або пошкодження елемента ОКІ унаслідок дії ЗПН (заміна, або ремонт елемента ОКІ, якщо це можливо),

E_N – вартість непрямих втрат від знищення або пошкодження елемента ОКІ унаслідок дії ЗПН.

Такі втрати можуть враховувати недоотримані прибутки від раптової зупинки елемента ОКІ, втрати третіх сторін, втрати через час відновлення або ремонту елемента тощо.

Пряма приведена вартість інженерної захисної споруди може бути на першому етапі визначена як сумарна кошторисна вартість її улаштування, витрат на її відновлення і на експлуатацію впродовж терміну служби до заміщення. Це добре підходить для систем захисту першого рівня.

Для систем другого і третього рівня, які зводяться на значний термін і є капітальними спорудами, необхідний більш комплексний та детальний аналіз приведених витрат.

Пряма приведена вартість, пов'язана із системою інженерного захисту, C_{IP} – може бути визначена як капітальні витрати ЖЦ:

$$C_{IP} = C_{IPO} + C_{IPR} + C_{IPM}, \quad (6.2)$$

де C_{IPO} – приведені капітальні витрати на спорудження захисної системи;

C_{IPR} – вартість ремонтів пошкоджень системи, що настали від дії факторів ураження за розрахунковий термін експлуатації;

C_{IPM} – вартість обслуговування захисної системи та її підсистем. За статистикою для промислових об'єктів, може бути прийнятий на весь розрахунковий термін експлуатації споруди як 2% від C_{IPO} [8].

Непряма вартість інженерного захисту C_{TS} , може бути визначена так:

$$C_{TS} = C_{TSO} + C_{TSS} \quad (6.3)$$

де C_{TSO} – недоотриманий прибуток власника ОКІ унаслідок вимушеної контрольованої тимчасової зупинки обладнання і технологічних перерв роботи на час улаштування захисної системи та інші можливі непрямі втрати оператора;

C_{TSS} – можливі непрямі соціально-економічні втрати держави, такі як незгенерований ВВП за час простою і падіння потужності, втрати, пов'язані із ОКІ підприємств тощо.

Цей критерій є найважчим для визначення, так як відмови у роботі інфраструктури та економічні збитки через них є складним явищем для аналізу. Підприємства, які істотно залежать від інфраструктури енергогалузі (наприклад, від електроенергії, газу), мають найрізноманітніше призначення. Отримати інформацію щодо обігу ресурсів, продуктів, послуг і коштів у соціально-економічних мережах і об'єктах, які неявно, але сильно взаємозв'язані – досить важко. Крім того, елементи інфраструктури залежать один від одного (а іноді взаємозалежні), і це означає, що перебої може поширюватися з каскадним ефектом. Існуючі відомі спостереження за подіями, що супроводжують відмови на ОКІ, є поодинокими та неповними. Складні обставини, що характеризують будь-яку конкретну подію відмови, є досить унікальними і навряд чи повторяться у майбутньому. Моделювання та розуміння поширення впливу відмови інфраструктури на підприємства та економіку потребує структури, яка розглядає такі дії: процеси та наслідки відмов фізичної інфраструктури з точки погляду втрат фізичного капіталу та відмов у потоках послуг; викликані ними відмови в бізнесі та економічні втрати в ширших макроекономічних секторах. Крім того, через просторову та часову природу як самої відмови інфраструктури, так і економіки, на яку вона впливає, необхідно включати ширші, багаторегіональні втрати та можливі вигоди від ефектів заміщення елементів ОКІ. Доведено, що відносно невеликі порушення в місцевій економіці можуть призвести до відносно великих макроекономічних наслідків, і чим більше відмова, тим менша ймовірність того, що інші регіони зможуть компенсувати її негативні наслідки [21]. Ці параметри найскладніше оцінити через їх комплексність.

На основі аналогів, розглядаючи перебої електроенергії від природних та техногенних лих, можливо спрощено вирахувати C_{TSS} через коефіцієнт збільшення втрат від непрямих наслідків відмов у інфраструктурі, Агентство з навколишнього середовища Великої Британії, наприклад, традиційно використовує коефіцієнт підвищення, який дорівнює приблизно 2, у своїх довгострокових інвестиційних сценаріях, тоді як деякі дослідження

використовували коефіцієнт 1,89 [22]. Отже, соціально-економічні збитки вважаються в 1,89...2 рази більшими за прямі збитки з урахуванням відмов інфраструктури. Розглядаючи макроекономічні наслідки на національному рівні, результати імітаційних досліджень [22] свідчать, що щоденні прямі втрати виробництва можуть зрости до коефіцієнта, рівного 33, а загальні втрати виробництва – до коефіцієнта 3 (тобто у трикратному розмірі), якщо додати до оцінювання втрат ймовірності критичних відмов у інфраструктурі.

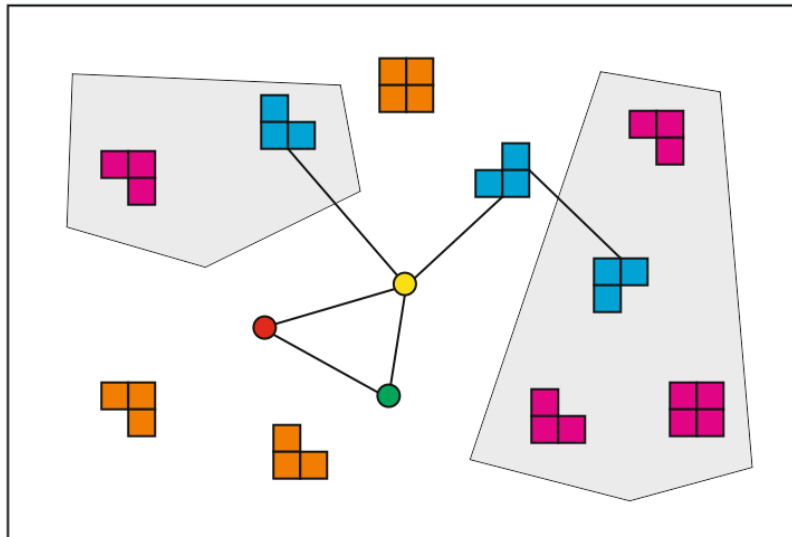


Рис. 6.7. Схема впливу пошкодження ОКІ від дії ЗПН. Круги – елементи ОКІ: червоний – безпосередньо уражений елемент; жовтий – відмова пов'язаного елемента; зелений – неушкоджений елемент; блакитний колір – відмови безпосередньо пов'язаних із ОКІ об'єктів-споживачів; бузковий – непрямі відмови об'єктів у зоні обслуговування і послуг безпосередньо пов'язаних об'єктів; жовтогарячий – об'єкти, які не зазнали впливу

Як наочно відображено у схемі рис. 6.7, об'єкти критичної енергетичної інфраструктури пов'язані як з іншими ОКІ, забезпечуючи живлення їх основної функції, так і інших споживачів, кожен із яких може не мати великого рівня критичності, проте він стає таким у разі вимкнення із мережі головних, більш важливих елементів, або ж певної, критичної кількості менш важливих.

Розглянемо більш детально побудову математичної моделі і методики вибору систем інженерного захисту ОКІ на реальних прикладах.

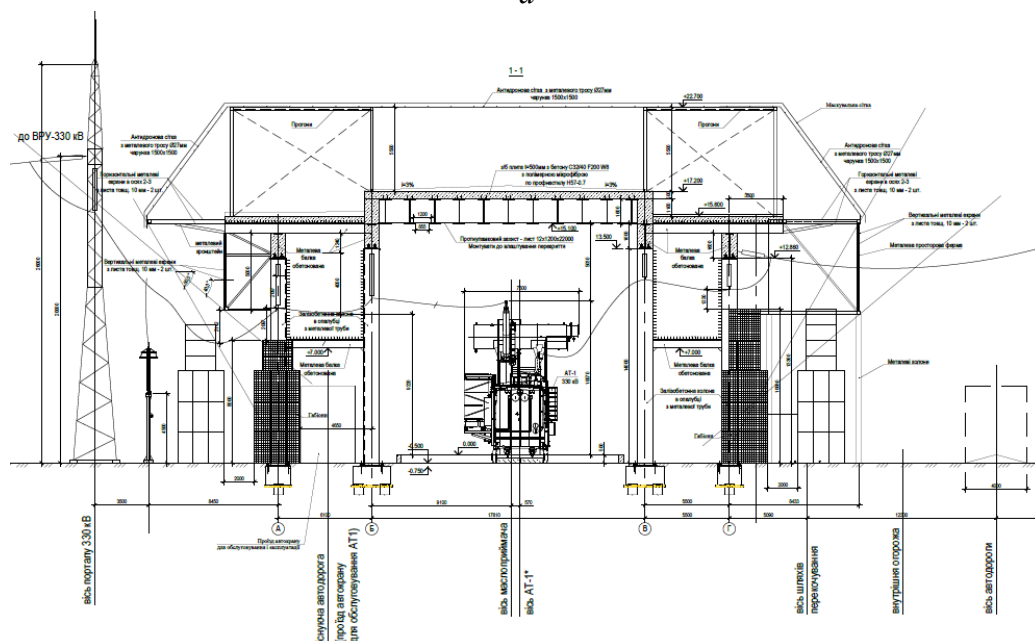
6.2. Приклади порівняльного економічного оцінювання життєвого циклу об'єктів критичної інфраструктури

Розглянемо запропоновану вище методику для завдань порівняння варіантів стратегій дій ОПР у ході інженерного захисту елементів ОКІ.

Приклад 6.1. Вирішимо задачу визначення доцільності улаштування споруди другого рівня захисту типу “Шелтер” для одиночного елемента трансформатора типової ПС 750/330/110 кВ, рис. 6.8.



a



б

Рис. 6.8. Вигляд майданчика станції – *a*; *б* – поперечний переріз концепції проєкту окремої захисної споруди типу “Шелтер” другого рівня захисту для трансформатора

Для визначення кожної зі складових нерівності застосуємо змішаний комплектний підхід (6.1). Спочатку з’ясуємо вихідні дані, необхідні для розрахунків.

Приведені капітальні витрати на зведення захисної споруди C_{IPO} для цього прикладу було отримано на основі проєктно-кошторисної документації від підрядної організації забудовника захисних споруд ОКІ [23]:

$$C_{IPO} = 650\,000\,000 \text{ грн.}$$

Також від підрядної організації були отримані графіки будівництва. Загальна прогнозована тривалість будівельних робіт становить $T_w = 6$ місяців. Орієнтовний графік виконання робіт із спорудження споруди другого рівня захисту наведений у табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Орієнтовний графік виконання робіт із спорудження споруди другого рівня захисту типу “Шелтер” (будівельна частина)

Найменування робіт	Місяць					
	1	2	3	4	5	6
Підготовчий етап						
Вибір місця розташування споруди, ділянки біля існуючого обладнання (або на місці пошкодженого)						
Отримання ТЗ на проектування						
Вишукування						
Улаштування випробувальних паль та випробування						
Виконання стадії “П”						
Затвердження стадії “П”						
Експертиза проєкту						
Будівельні роботи (1 черга)						
Отримані дані випробування паль						
Розроблення проєктної документації стадії “Р”						
Розробка ґрунту планування території						
Влаштування пальових фундаментів						
Виконання монолітних ростверків						
Виконання монолітних колон висотою 20м						
Монтаж металевих балок висотою 1,5м						
Виконання монолітної плити перекриття						
Виконання монолітних опор						
Виконання плити фундаменту та монтаж зовнішніх стін						
Виконання стяжки						
Виконання захисного екрану та планування проїздів						
Вогнезахист та пожежогашіння камери АТ						

Потужність вузлової розподільної підстанції на 750/330/110 кВ, яка розглядається, 1000 мегавольт-ампер (МВА). Кількість споживачів, які зав’язані на головний актив (трансформатор), надана оператором довідково $Q_c = 144\,281$.

Станом на час проведення дослідження, відомо, що Кабінет міністрів України встановив для всіх жителів України фіксовану ціну на електроенергію, що діятиме з 1 червня по 31 грудня 2023 року. Вона становить 2,64 грн/кВт·год незалежно від обсягу споживання. Фіксована ціна застосовуватиметься під час розрахунків, починаючи з червня 2023 року. Отже, можливо брати середній грошовий тариф для споживача за 1 кВт·год, $V_{el} = 2,64$ грн/кВт·год.

За даними НКРЕКП, середньомісячне споживання електроенергії на одне домогосподарство в Україні становить 150..164 кВт·год. Для проведення розрахунків у цьому прикладі, усереднено приймаємо споживачів прирівняними до домогосподарств, але із вищою оцінкою у $C_{el} = 164$ кВт·год.

Оскільки ПС – це хоч і ключовий, але тільки розподільний і перетворювальний вузол енергомережі, її частка у загальному ланцюжку створення вартості становить 10...30%, експертно можливо прийняти 20%.

Отже, тоді прибуток від активу ПС за місяць від перетворення електроенергії для визначеної кількості споживачів становить

$$I_m = Q_c \cdot V_{el} \cdot C_{el} \cdot 0,2 = 12\,493\,580 \text{ грн.},$$

що виглядає реалістичною сумою. Недоотриманий прибуток унаслідок простоювання та час облаштування захисту розраховують за формулою

$$C_{TSO} = T_w \cdot I_m = 74\,961\,482 \text{ грн.}$$

За даними статистики від ДССЗІ, кількість влучань “Шахід-131” та “Шахід-136” на 50 ОКІ за звітний розглянутий період 60 днів (2 місяці) – 17 влучань. Це число вже враховує ефективність систем ППО, так як розглядаються тільки ті БпЛА, які долетіли до елементів ОКІ, також взята до уваги точність та надійність БпЛА (тільки влучання, які призвели до пошкоджень елемента ОКІ, без відокремлення їх ступеня важкості). У той же час розглянутий період належить до фази найбільш масованих атак ОКІ саме енергетично-паливного сектору національної економіки. Якщо розглядати розрахункові терміни ЖЦ рік та більше, то може бути усереднено вдвічі меншу інтенсивність (коефіцієнт 0,5). Це дає наступну середню кількість влучань у ОКІ на рік:

$$P_A = 17 / (50 \cdot 2) \cdot 12 \cdot 0,5 = 1,02.$$

Розрахунковий термін ЖЦ для звичайних умов комерційного будівництва зазвичай беруть 20...30 років, так як це відповідає інвестиційному циклу до реновації або ремонту об'єкта [9]. В цілому, розрахунковий термін ЖЦ відображає досліджуваний період між фазовими перетвореннями об'єкта [8]. У випадку ж захисних споруд ОКІ (і не тільки), новим фазовим станом після створення є дія загроз, зумовлених воєнними діями. Отже, для таких об'єктів прогностичним періодом є час закінчення війни. Зі світової історії відомо, що більшість воєн закінчуються за один рік. Війна РФ проти України є атиповою, так як триває із 2014 року, а із 2022 року – увійшла у фазу відкритого повномасштабного вторгнення. Проте за узагальненим мінімальним експертним оцінюванням можливо передбачити, що час до закінчення активної фази війни становить не менше 2 років [24]. Відтоді кількість уражень елемента ОКІ за розрахунковий термін $T_o = 2$ років буде становити $T_o \cdot P_A = 1,02 \cdot 2 = 2,04$ разів.

Вартість ремонту захисної споруди після поодинокого ураження від ЗПН (проектного, так як вона на це розрахована) може експертно становити до 5% її вартості. Вартість ремонтів після уражень за розрахунковий термін тоді буде становити

$$C_{IPR} = C_{IPO} \cdot 0,05 \cdot 2,04 = 66\,300\,000 \text{ грн.}$$

Вартість поточного обслуговування захисної споруди C_{IPM} як було вказано вище, може бути взята як 1% від C_{IPO} /рік. Тоді на весь розрахунковий термін життя споруди вартість поточного обслуговування захисної споруди буде така:

$$C_{IPM} = 0,01 \cdot C_{IPO} \cdot T_o = 0,01 \cdot 650000000 \cdot 2 = 1\,300\,000 \text{ грн.}$$

Оскільки підстанція є державною власністю, критерій непрямих соціально-економічних втрат C_{TSS} є застосовним. На цьому етапі досліджень, поки не можливо встановити втрати на основі статистичних даних або на основі моделювання. З консервативних міркувань, коефіцієнт збільшення втрат від непрямих наслідків відмов у інфраструктурі може братися 1,89 (див. вище). Дані витрати є одноразові:

$$C_{TSS} = 1,89 \cdot C_{TSO} = 1,89 \cdot 74\,961\,482 = 141\,677\,201 \text{ грн.}$$

Таким чином, загальна приведена вартість захисту становитиме:

$$C_p = 650\,000\,000 + 74\,961\,482 + 141\,677\,201 + 66\,300\,000 + 1\,300\,000 =$$

934 238 683 грн.

Вартість прямих втрат від ураження і знищення або пошкодження елемента ОКІ унаслідок дії ЗПН, як наведено вище, **одноразові втрати** $E_D = 356\,253\,480 \text{ грн.}$

E_N – вартість непрямих втрат від знищення або пошкодження елемента ОКІ внаслідок дії ЗПН. Такі втрати можуть враховувати недоотримані прибутки від раптової зупинки елемента ОКІ, втрати третіх сторін на час відновлення або ремонту елемента тощо:

$$E_N = E_{DSO} + E_{DL} + E_{DM}$$

де E_{DSO} – недоотриманий прибуток унаслідок простоювання на час ремонту/відновлення елемента ОКІ. Як було обчислено раніше, $I_m = 12\,493\,580 \text{ грн}$, що виглядає реалістичною сумою. T_{rt} – час ремонту/відновлення, який дорівнює 271,67 діб за один випадок ураження елемента ОКІ, визначений на основі реальної статистики (див. вище). З огляду на обчислене, недоотриманий прибуток через простоювання на час улаштування захисту буде становити **одноразові втрати**:

$$E_{DSO} = T_{rt} \cdot I_m = 271,67/30 \cdot 12\,493\,580 = 113\,137\,699 \text{ грн.}$$

де E_{DL} – недоотриманий прибуток внаслідок падіння потужності підстанції через пошкодження активу. При **кожному випадку** ураження елемента на підстанції, на порівняно невеликий час падає потужність, поки персонал не відновить постачання електроенергії за тимчасовою схемою. Таким чином

$$E_{DL} = T_{pl} \cdot I_m \cdot p_{pl} = 51,69/30 \cdot 12\,493\,580 \cdot 56,43\% = 12\,147\,370 \text{ грн.}$$

Непрямі оціночні соціально-економічні **одноразові** втрати у разі ураження ОКІ становитимуть

$$E_{DM} = E_{DL} \cdot 1,89 = 12\,147\,370 \cdot 1,89 = 22\,958\,528 \text{ грн.}$$

Отримана оцінка ризику співмірна із наслідками техногенних та природних лих. Наприклад, під час аналізу наслідків поведінки у Великій Британії, що тривала 1/100 року, встановлено, що відмова підстанції потужністю 132 кВ вплинула на 61 000 об'єктів, електропостачання яких було поступово відновлено протягом двох днів, а відключення вплинуло на понад 100 000 людей [25], швидкість втрат була оцінена у 10 мільйонів фунтів стерлінгів за два дні. Безперечно, наведений розрахунок не відображає всіх особливостей та витрат ураження елементів ОКІ але дає інформацію про порядок і масштаби втрат.

У нашому прикладі сукупні непрямі **одноразові** втрати становитимуть:
 $E_N = E_{DSO} + E_{DL} + E_{DM} = 113\,137\,699 + 12\,147\,370 + 22\,958\,528 = 148\,243\,597$ грн.

Загальні втрати, пов'язані з ураженнями трансформатора протягом розрахункового терміну ЖЦ у разі застосування стратегії небудівництва інженерної захисної споруди, становитимуть:

$$E_C = (E_D + E_N) \cdot T_o \cdot P_A = (356253480 + 148243597) \cdot 2 \cdot 1,02 = 1\,029\,174\,037 \text{ грн.}$$

Як бачимо, у кінцевому результаті **1 029 174 037 > 934 238 683 грн.**, отже, для прийнятих параметрів **будівництво інженерної захисної споруди є економічно виправданим.**

Приклад 6.2. Розглянемо питання прийняття рішення із визначення доцільності улаштування заглибленої споруди третього рівня інженерного захисту для групи обладнання елемента типової ПС 750/330/110 кВ (прийнята місткість споруди – три трансформатора, рис. 6.9).

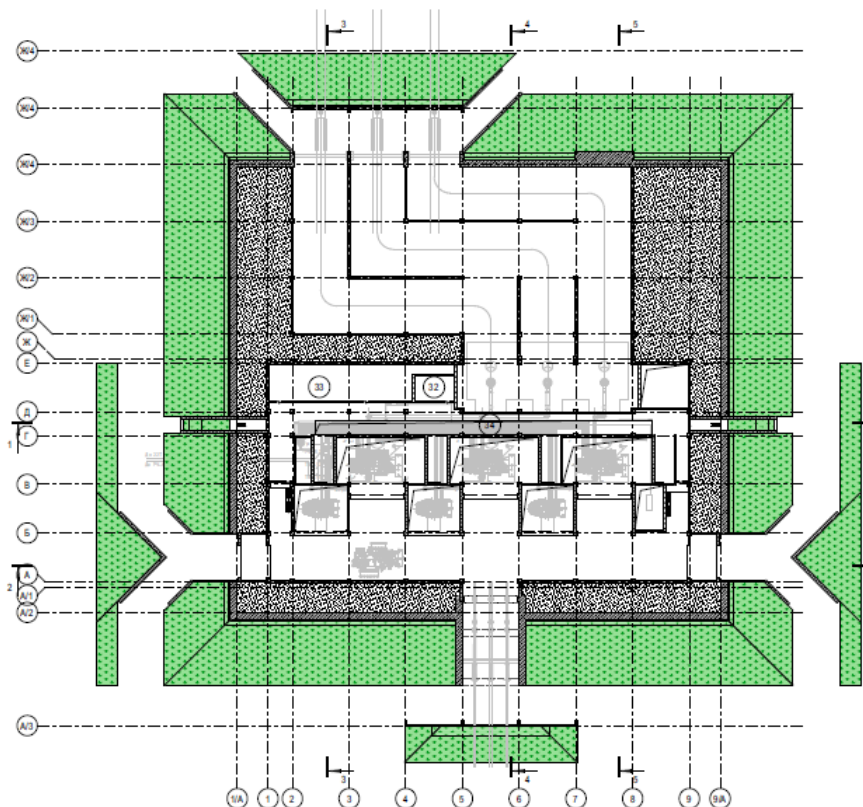


Рис. 6.9. План концепції проекту споруди третього рівня інженерного захисту для трьох трансформаторів та супутнього обладнання

Застосуємо змішаний комплексний підхід до визначення кожної зі складових нерівності (6.1). Спочатку з'ясуємо вихідні дані, необхідні для розрахунків. Надані капітальні витрати на спорудження захисної споруди C_{IPO} для цього прикладу було отримано на основі проектно-кошторисної документації, наданої від підрядної організації забудовника споруд захисту ОКІ [23]:

$$C_{IPO} = 2\,956\,000\,000 \text{ грн.}$$

Також від підрядної організації були отримані графіки будівництва. Загальна тривалість будівельних робіт $T_w = 12$ місяців (див. плановий графік у табл. 6.3).

Таблиця 6.3

Орієнтовний графік виконання робіт із спорудження споруди третього рівня захисту (будівельна частина)

Найменування робіт	Місяць											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Підготовчий етап												
Вибір місця об'єкту												
Отримання ТЗ на проектування												
Вишукування												
Випробування паль												
Виконання стадії "П"												
Затвердження в НЕК "Укренерго" опитувальних листів												
Надсилання виробникам опитувальних листів для стадії "Р"												
Затвердження стадії "П"												
Експертиза проекту												
Будівельні роботи												
Отримані дані випробування паль												
Розроблення проекту стадії "Р"												
Земляні роботи та дренаж												
Забивка/буріння паль (100 паль у день)												
Виконання монолітних ростверків 3/1,5 м												
Виконання колон висотою 11,5 м												
Монтаж металевих балок висотою 1,5 м												
Виконання монолітної плити перекриття												
Виконання піщаної подушки та виїзду												
Виконання тюфяка												
Виконання внутрішньої плити фундаменту та монтаж зовнішніх стін												
Виконання маслозбірника, резервуара води												
Монтаж внутрішніх стін												
Виконання стяжки												
Виконання захисних стін та проїздів												
Монтаж внутрішніх інженерних мереж												

Усі інші вихідні дані були взяті, як для прикладу 6.1 із урахуванням стовпчику “усереднені” із табл. 6.1. $V_{el} = 2,64$ грн/кВт·год. $C_{el} = 164$ кВт·год. із попереднього розрахунку. $Q_c = 144\,281$ грн, і відповідно $I_m = 12\,493\,580$ грн., $T_{rt} = 271,67$ діб, $T_{pl} = 51,69$ діб, $p_{pl} = 56,43$ %.

Спори́ди, які будується відповідно до третього рівня захисту, призначені захищати елементи ОКІ як від прямих влучань БпЛА, так і ракет. За наявною від ДССЗІ статистикою, кількість влучань БпЛА типу “Шахід-131/136” та ракет різного типу із статистики на 50 об’єктів за період 60 днів – 92 влучання (подана кількість влучань із тих, які призвели до пошкоджень, без розділення їх ступеня важкості), отже за рік, з урахуванням коефіцієнта нерівномірності 0,5 нападів порівняно із досліджуваним активним періодом, для трьох активів:

$$P_A = 92 / (50 \cdot 2) \cdot 12 \cdot 0,5 \cdot 3 = 5,52.$$

Кількість комбінованих уражень елемента ОКІ за розрахунковий період $T_o = 2$ років, буде становити $T_o \cdot P_A = 5,52 \cdot 2 = 11,04$ разів.

Недоотриманий прибуток внаслідок простоювання на час будівництва захисної споруди

$$C_{TSO} = T_w \cdot I_m = 449\,768\,893 \text{ грн.}$$

В даному випадку консервативно взята лінійна модель без урахування існуючого ОКІ, який може працювати паралельно.

Вартість ремонту захисної споруди після поодинокого ураження (проектного, так як вона на це розрахована) може експертно становити до 5% її вартості. Вартість ремонтів після ураження за розрахунковий період тоді буде становити

$$C_{IPR} = C_{IPO} \cdot 0,05 \cdot 11,04 = 1\,631\,712\,000 \text{ грн.}$$

Вартість поточного обслуговування захисної споруди C_{IPM} як було вказано вище, може бути прийнята як 1% від C_{IPO} /рік. Тоді на весь розрахунковий термін життя споруди вартість поточного обслуговування захисної споруди

$$C_{IPM} = 0,01 \cdot C_{IPO} \cdot T_o = 0,01 \cdot 2\,956\,000\,000 \cdot 2 = 5\,912\,000 \text{ грн.}$$

Оскільки розглядувана підстанція є державною власністю, критерій непрямих соціально-економічних втрат C_{TSS} є застосовним. Із наведеним вище коефіцієнтом 1,89 одноразових витрат:

$$C_{TSS} = 1,89 \cdot C_{TSO} = 1,89 \cdot 449\,768\,893 = 850\,063\,207 \text{ грн.}$$

Таким чином, загальна приведена вартість захисту складатиме, округлено:

$$C_p = 2\,956\,000\,000 + 449\,768\,893 + 850\,063\,207 + 1\,631\,712\,000 + 5\,912\,000 = \mathbf{5\,893\,456\,100 \text{ грн.}}$$

Так як споруда захищає одразу три ключові елементи ОКІ, розрахункові дані пораховані для трьох активів:

Вартість прямих втрат від ураження і знищення або пошкодження елемента ОКІ унаслідок дії ЗПН

$$E_D = 240505924 \cdot 3 = 721\,517\,772 \text{ грн.}$$

$$E_{DSO} = T_{rt} \cdot I_m \cdot 3 = 233/30 \cdot 12493580 \cdot 3 = 291\,100\,422 \text{ грн.}$$

$$E_{DL} = T_{pl} \cdot I_m \cdot p_{pl} \cdot 3 = 51,69/30 \cdot 12493580 \cdot 56,43\% = 49\,955\,081 \text{ грн.}$$

Непрямі соціально-економічні **одноразові** втрати у випадку уражень ОКІ

$$E_{DM} = E_{DL} \cdot 1,89 \cdot 3 = 49\,955\,081 \cdot 1,89 \cdot 3 = 283\,245\,311 \text{ грн.}$$

Сукупні непрямі **одноразові** втрати відтоді становлять:

$$E_N = E_{DSO} + E_{DL} + E_{DM} = 291\,100\,422 + 49\,955\,081 + 283\,245\,311 = 624\,300\,814 \text{ грн.}$$

Загальні втрати, пов'язані із ураженнями трьох трансформаторів протягом розрахункового періоду ЖЦ, при застосуванні стратегії небудівництва інженерної захисної споруди, становлять:

$$E_C = (E_D + E_N) \cdot T_o \cdot P_A = (721\,517\,772 + 624\,300\,814) \cdot 2 \cdot 5,52 = 14\,857\,837\,194 \text{ грн.}$$

Отже, у результаті, **14 857 837 194 > 5 893 456 100 грн**, для заданого набору даних **будівництво інженерної захисної споруди є економічно обґрунтованим.**

Порівняльні дані за прикладами 6.1 та 6.2 зображені на рис. 6.10.

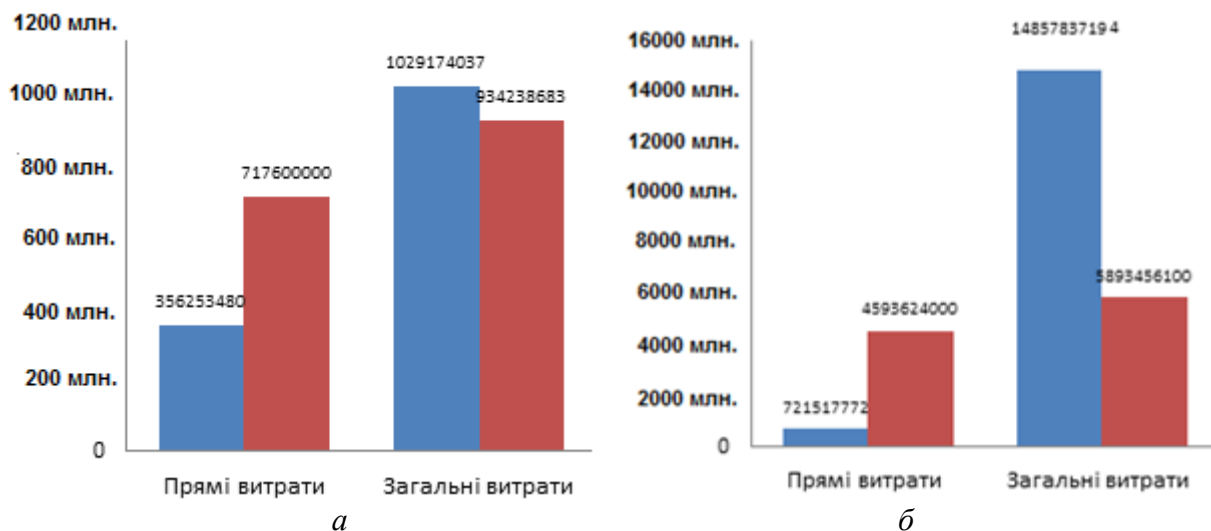


Рис. 6.10. Гістограми порівняння результатів розрахунків витрат, грн: *а* – для споруд другого рівня захисту; *б* – для споруд третього рівня захисту; сині стовпчики без інженерного захисту, червоні – із інженерним захистом

Важливо зазначити, що відновлення кожного трансформатора без його захисту – не дає гарантії проти чергового ураження. Фактичні терміни виведення з ладу та доставки і монтажу обладнання – значні, а частота уражень – істотна, що свідчить про те, що під час доставки обладнання час

його продуктивної роботи до чергового ураження – може бути дуже малим. Окрім того, навіть після завершення війни конфлікт із застосуванням ЗПН може спалахнути за деякий час знову, і ураження ОКІ будуть завдаватися знову. Розроблена в цьому розділі модель наразі не враховує другорядні складові витрат, які чинять мало впливу на загальні вартісні показники, а також вартість грошей у часі. Проте отримані результати достовірні для обґрунтування та прийняття рішень щодо доцільності спорудження та визначення типів інженерного захисту елементів ОКІ.

Заглиблені підстанції знаходять все більше застосування в світі, але поки не через захисні властивості, а насамперед через економію надземного простору та зручність оперування підземними лініями електроживлення (рис. 6.11).

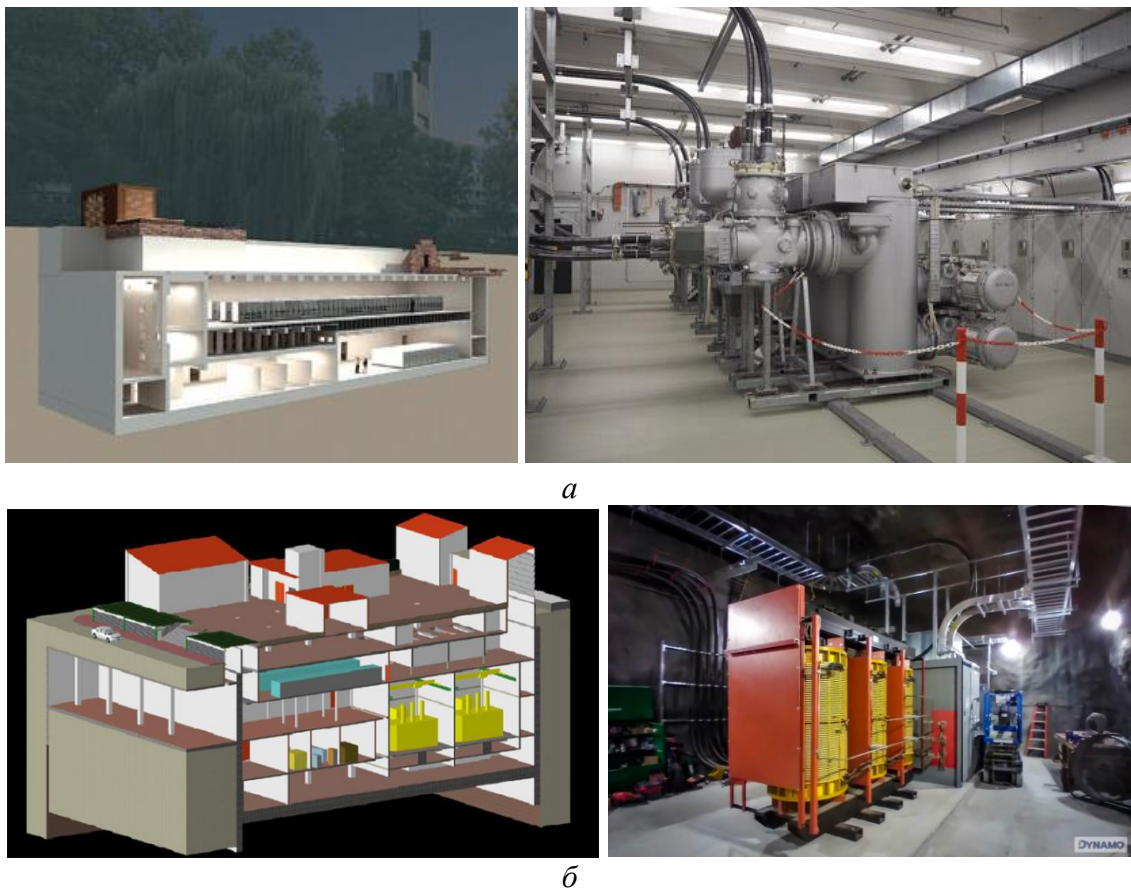


Рис. 6.11. Приклади споруд заглиблених підстанцій: *а* – підстанція Mainova, розміщена на 17 метрів нижче рівня вулиці, Франкфурт, Німеччина [26] ; *б* – підземна підстанція у Klong Toey, Таїланд [27]

Отримані нами вище у прикладах результати корелюють із подібними, отриманими у інших країнах. Так, масштабні дослідження, проведені у Норвегії та США показали, що підземні споруди можуть мати меншу вартість ЖЦ порівняно із напівзаглибленими та наземними будівлями при нижчих ступенях захисту останніх (рис. 6.12).

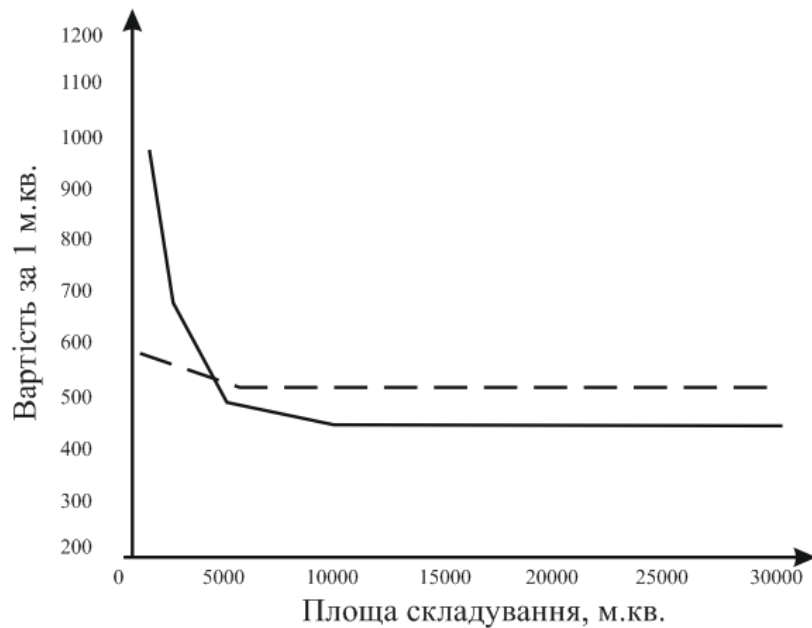


Рис. 6.12. Порівняння вартості ЖЦ об'єктів, заглиблених у скелі та на поверхні за весь час експлуатації (витрати у норвезьких кронах) [28], суцільна лінія – заглиблені споруди, штрихова – наземні

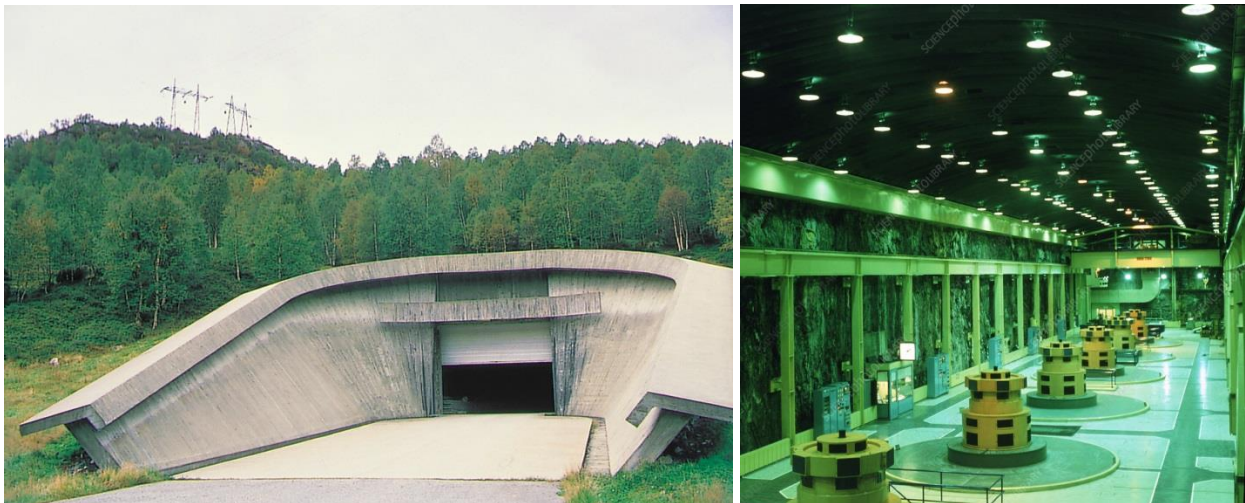


Рис. 6.13. Заглиблена електростанція, розташована в муніципалітеті Sirdal, Канада, яка знаходиться на глибині 300 м під землею. Вона була введена в експлуатацію у 1973 році [29]

У вищезазначених дослідженнях було встановлено, що для тривалого ЖЦ (проте для періоду мирного часу, без урахування уражень від ЗПН), захищені об'єкти заглибленого розташування із площею 5000 м² та більше є економічнішими, ніж ті, що розташовані наземно.

Такі результати для заглиблених об'єктів завдячують насамперед таким факторам (див. також розділ 3):

- економія на опаленні, кондиціонуванні, огорожувальних і несучих конструкціях, вікнах тощо;
- збережувальність та висока адаптивність в наприкінці експлуатації
- менший знос систем, стійкість до зовнішніх факторів, менші витрати на обслуговування;

- можливості використання та переулаштування існуючих заглиблених просторів (за їх наявності).

Безперечно для нашої країни, порівняння ЖЦ споруд наземного і підземного типу має відбуватися за умов досягнення еквівалентного рівня захисту.

Розроблена методика оцінювання вартості ЖЦ інженерних захисних споруд для елементів ОКІ придатна також для інших типів будівель і споруд, а також надалі дозволяє визначати ефективність та доцільність вибору тих чи інших систем ППО, через регулювання фактичної або прогнозованої кількості влучань ЗПН, які призводять до пошкоджень елементів ОКІ.

6.3. Напрямки підвищення ефективності та подальшого розвитку інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури від засобів повітряного нападу противника

Основними напрямками для підвищення ефективності інженерного захисту ОКІ за умов воєнного стану можна визначити наступні.

I. Деталізація та врахування можливих загроз. У цій монографії фокус уваги цілком виправдано надано тільки ЗПН противника як головній загрозі для ОКІ енергетичної галузі за умов воєнного часу. Загальний спектр загроз воєнного часу значно ширший (рис. 6.14). Для реального ОКІ всі вони мають бути оцінені та враховані у реальному проектуванні. Деякі із них належать і до мирного часу експлуатації ОКІ. Також у майбутніх дослідженнях варто розглянути можливі температурні дії ЗПН на елементи та захисні споруди ОКІ, їх потенційний електромагнітний та інші впливи, урахувати прогнози перспективного розвитку озброєнь противника.

II. Розроблення новітніх систем інженерного захисту, вдосконалення та експериментальне підтвердження методик їх розрахунків. Так само, з іншого боку, варто розглянути перспективні системи інженерного захисту, їх роль у системі взаємодії із іншими системами і підсистемами ОКІ. До цього питання належать такі:

- виготовлення конструкцій інженерного захисту із композитних матеріалів, високоміцних та надвисокоміцних сталей, високоміцних бетонів;
- впровадження новітніх методів виготовлення, транспортування і монтажу конструкцій, розвиток технологій заглибленого і підземного будівництва;
- підготовка відповідних інженерних та робітничих кваліфікованих кадрів для робіт із визначення та менеджменту загроз, проектування систем інженерного захисту та їх спорудження;
- удосконалення супутніх систем, таких як раннє оповіщення, ефективне пожежогасіння, оснащення ОКІ автоматизованими системами моніторингу й управління небезпекою тощо;
- розроблення спеціальних рухомих заповнень просвітів, які здатні за допомогою датчиків вчасно закриватися, витримуючи значні піковий зовнішній тиск та інші загрози.



Рис. 6.14. Спектр загроз воєнного часу [30]

З огляду на перманентний зростаючий характер загроз від ЗПН противника для енергетичної та інших галузей інфраструктури України, так і та численних типів цивільних об'єктів, доцільним вбачається проведення широкого спектра натурних експериментів, заснування спеціалізованих лабораторій із вибухотехнічного дослідження захисних споруд, матеріалів та конструкцій.

III. Втілення розроблених методик оцінювання вартості ЖЦ споруд у державних і приватних тендерних закупівлях. Одним із перспективних напрямків втілення запропонованих методик оцінювання вартості ЖЦ є їх урахування у ході **тендерних закупівель**. Зокрема із 2020 року у сфері як цивільних, так і оборонних закупівель (система “Prozorro”) було [31] запроваджено, що “найбільш економічно вигідною тендерною пропозицією електронна система закупівель визначає тендерну пропозицію, ціна якої є найнижчою. Критеріями оцінювання є: ціна, або **вартість життєвого циклу**, або ціна разом з іншими критеріями оцінювання, що пов’язані із предметом закупівлі” [32]. Таким чином у ОПР (власник, оператор ОКІ тощо) з’явився ефективний фактор для оцінювання і вибору кращих рішень із інженерного захисту ОКІ. Проте добровільний характер вибору критерію вартості ЖЦ, видима складність і непрозорість його обрахунків, відсутність розповсюджених та орієнтованих на користувача посібників, а особливо комп’ютерних спеціалізованих інструментів – призвели до того, що вартість ЖЦ так і не набула поширення під час тендерних торгів. Вочевидь, слід ретельно попрацювати над усуненням цих недоліків і зважати на вартість ЖЦ обов’язково у ході вибору систем інженерного захисту чи прийнятті інших рішень, пов’язаних із фінансовими витратами щодо безпеки ОКІ. Отже, у вітчизняного проєктанта поступово з’являється нормативно обґрунтована можливість застосування інструментів оцінювання ЖЦ, у тому числі для

раціонального вибору конструктивного рішення захисних інженерних споруд у ході тендерних закупівель.

IV. Збирання глибшої статистики та проведення аналітики щодо уражень ОКІ, впровадження ефективних методів відновлення елементів ОКІ та їх захисту. У багатьох випадках, кожен ОКІ в Україні та його елементи є тестовим полігоном для вивчення багатьох параметрів сучасної війни. Збирання інформації щодо складових та ефектів уражень ОКІ, запроваджена ГШ ЗСУ через ДССЗІ із грудня 2022 року, дозволила отримати рішення і методики, надані у цій монографії. Проте лишаються проблемними питання, які потребують подальшого розвитку:

- ретельне і своєчасне збирання більш точних даних щодо ОКІ та наслідків їх уражень у взаємодії між окремими залученими державними органами та інституціями, операторами та іншими причетними сторонами;
- створення єдиної бази даних, “біг дата” про складові ОКІ та їх уразливість до дії ЗПН;
- якісний і чесний аналіз подій під час уражень за результатами повітряних нападів або надзвичайних ситуацій на ОКІ.

Зрештою, визнання, опрацювання та переосмислення помилок дозволить реалізувати провідну у Світі концепцію “Build–Back–Better” – (“Будуй–заново–краще”) у напрямку зменшення ризику для відбудованих та нових об’єктів (рис. 6.15).

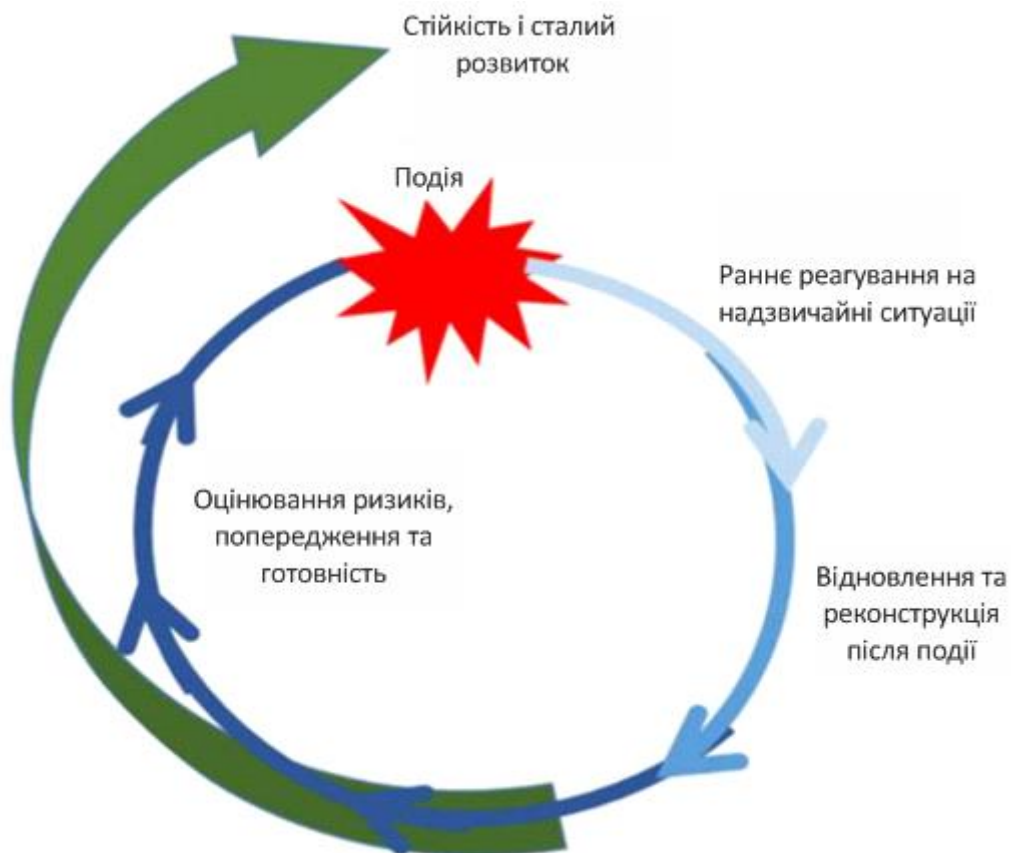


Рис. 6.15. Концепція “Build–Back–Better” у циклі зменшення ризику [33]

Такий підхід враховує досвід виявлення слабких місць, організаційні та інші недоліки, що виявлені під час ЖЦ та аналізу ураження елементів ОКІ [34]. Ремонтопридатність, як компонент надійності виходить на перший план для споруд під час урахування загроз від ЗПН противника.

V. Удосконалення методик оцінювання та факторів вибору систем інженерного захисту. У цій монографії розглянуто вартість ЖЦ як основний критерій вибору прийняття рішень у ході спорудження ОКІ. Проте у майбутньому можливо додатково ураховувати такі фактори:

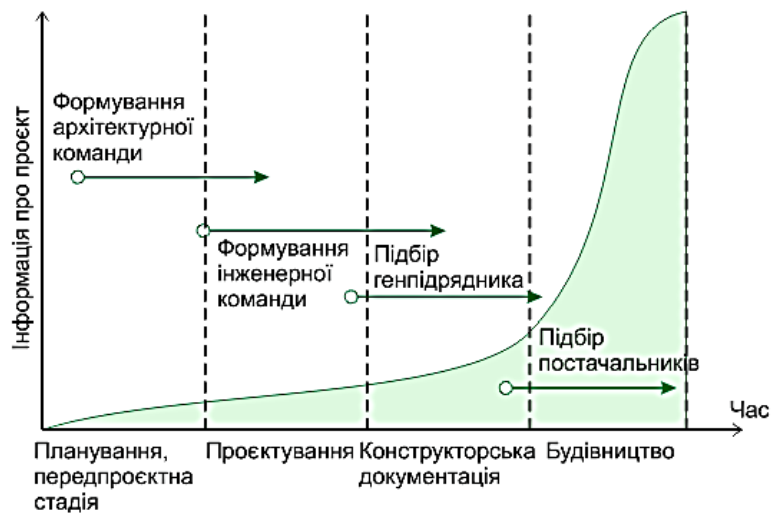
- оцінювання екологічності ЖЦ;
- адаптивність щодо нового обладнання;
- оперативність та ощадність ремонтно-відновних робіт після влучань ЗПН тощо.

Нормативний документ ДСТУ 9171 [13] регламентує, що 70% матеріалів, що використовуються у спорудах, у тому числі і у захисних спорудах ОКІ енергетичної галузі України, повинні мати можливості до реутилізації при заміщенні або/та в наступних ЖЦ. Це вкрай важливо, так як унаслідок уражень відбувається допустиме часткове пошкодження конструкцій споруд захисту ОКІ, яке може призвести до їх частої заміни, що не повинно спричиняти значну кількість відходів. Висока ремонтпридатність елементів захисту ОКІ не тільки сприяє екологічності об'єкта, а й живучості та швидкості його відновлення, а отже, мінімізації додаткових втрат через зупинку обладнання, збереження захисних властивостей після повторних можливих атак ЗПН.

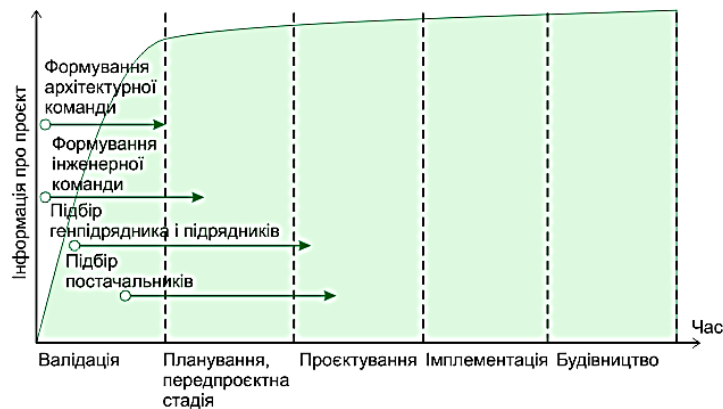
VI. Мінімізація відходів та відповідність принципам кругової економіки упродовж ЖЦ. Згідно з вимогами [14] збалансоване використання природних ресурсів доцільно враховувати ще на етапі проєктування споруди шляхом: створення умов для підвищення ефективності проєктних рішень, у тому числі щодо забезпечення раціональної експлуатації протягом економічно доцільного терміну; забезпечення можливостей повторного використання або перероблення матеріалів через утилізацію після знесення споруди; запобігання екологічних проблем. Під час розгляду можливості використання у ході будівництва матеріалів у проєктних рішеннях із інженерного захисту рекомендовано враховувати весь цикл їх життя, від виробництва до демонтажу, повторного використання або перероблення. Екосистеми під час підготовчих робіт, до і після будівництва мають бути збережені або перенесені з відновленням у повному обсязі.

У ході розроблення проєктних рішень рекомендовано надавати переваги варіантам, які сприяють зменшенню наявних відходів місцевої промисловості та будівельної діяльності. Залучення матеріалів і компонентів, технологій їх використання рекомендовано здійснювати з мінімізацією залишків і відходів, які підлягають утилізації в зв'язку з можливістю створення небезпеки довкіллю та персоналу. У ході використання матеріалів, рекомендовано аналізувати можливість збереження їх властивостей упродовж всього ЖЦ, враховуючи повторне використання або перероблення.

При цьому необхідно зважати на можливу зміну характеристик на етапах первинного і вторинного використання матеріалів, можливість зміни призначення і погіршення властивостей через старіння.



а



б

Рис. 6.16. Традиційний (а) та колаборативний підходи (б) у ході загального проектування будівель і споруд [36]

VII. Сталість, типізація та ефективне планування процесів спорудження захисних споруд. У ході проєктування слід передбачити ремонтпридатність та технологічність ремонтів, можливість оперативних ремонтів захисних конструкцій мінімальними засобами ресурсної доступності, наявність ремонтних комплектів та інструментів, навченого персоналу. **Сталість** – стан, який потребує від людини здійснювати свою діяльність таким чином, щоби захищати функції екосистеми Землі в цілому, яка включає в себе рослини та тварин, а також людей та їх спільне фізичне середовище існування. У цьому сенсі планета, із усіма її системами та підсистемами – життєво важливий і єдиний ОКІ для людства. Загальна мета сталості – мінімізувати негативні наслідки та максимально збільшити корисний вплив, забезпечуючи при цьому необхідну екологічну, економічну, соціальну та культурну цінність. Це потребує цілісного підходу, який об'єднує глобальні проблеми, а також цілі сталого розвитку та вимоги з

точки зору функціональності, ефективності та економічності продукції. Сталий розвиток у контексті будівництва має на меті досягти цих вимог, не зменшуючи довгострокову стійкість природного середовища, одночасно заохочуючи поліпшення економічних та соціально-культурних аспектів на місцевому, регіональному та глобальному рівнях [35].



a



б

Рис. 6.17. Втрати від *a* – невизначеності, і *б* – неефективності під час загальної реалізації будівель і споруд [36]

Згідно з дослідженнями, грамотне розроблення на етапі планування дозволяє визначити **понад 66% вартості ЖЦ будівлі**. Отже, сучасний ефективний підхід до проєктування повинен приділяти особливу увагу етапу планування і попереднього проєктування (preliminary design stage), переходячи від традиційного до колаборативного підходу, коли потужні команди проєктування та постачання підключаються для осмислення та оцінювання основних функціональних блоків та параметрів будівлі або

споруди ще на ранній стадії. Для цього важливими є детальне пророблення завдання і розуміння замовника усіх цінностей проєкту та інтегральних кроків із його реалізації (рис. 6.16). У типовому традиційному проєкті невизначеність, переважно викликана випадковостями, становить зазвичай близько 10–15% вартості проєкту, а загалом невизначеність і неефективність можуть збільшувати втрати/відходи у вартості проєкту до 30% (рис. 6.17).

Далі на основі методик оцінювання ЖЦ може бути розроблене спеціалізоване програмне забезпечення щодо оптимального прийняття рішень у ході інженерного захисту ОКІ.

VIII. Безперервний моніторинг стану та удосконалення систем захисту. Для поліпшення рівня захищеності ОКІ від факторів ураження ЗПН противника необхідно здійснювати безперервний моніторинг та оцінювання стану і ступеня інженерного захисту елементів ОКІ на місцях. При цьому пропонуються такі критерії оцінювання стану захищеності об'єкта критичної інфраструктури:

- відсоток виконаного ІЗ для елементів ОКІ, що потребують першого рівня захисту;
- відсоток виконаного ІЗ для елементів ОКІ, що потребують другого рівня захисту;
- відсоток виконаного ІЗ для елементів ОКІ, що потребують третього рівня захисту;
- технічний стан ІЗ для елементів ОКІ, що потребують першого рівня захисту (за наявності);
- технічний стан ІЗ для елементів ОКІ, що потребують другого рівня захисту (за наявності);
- технічний стан ІЗ для елементів ОКІ, що потребують третього рівня захисту (за наявності);
- наявність, ступінь виконання заходів та стан засобів із маскування та імітації елементів ОКІ, відсутність демаскувальних ознак елементів ОКІ;
- ефективність системи ППО на ОКІ (співвідношення загальної кількості збитих БпЛА до кількості спрямованих противником на ОКІ, та окремо співвідношення загальної кількості збитих ракет до кількості спрямованих противником на ОКІ, якщо такі випадки мали місце);
- наявність та ступінь виконання заходів із світломаскування елементів ОКІ;
- наявність паспорта захисту ОКІ, вчасність та інформативність заповнення інформаційних чек-лістів щодо переліку уразливих елементів ОКІ та результатів влучань у них ЗПН противника, якщо такі випадки мали місце;
- усереднені людські втрати після кожного влучання окремо БпЛА та окремо ракети противника, якщо такі випадки мали місце;
- усереднені прямі грошові втрати ОКІ після кожного влучання окремо БпЛА та окремо ракети противника, якщо такі випадки мали місце (відсоток падіння потужності, орієнтовна оціночна вартість відновлення);

- середній час зупинки та час на відновлення ОКІ після кожного влучання окремо БпЛА та окремо ракети противника, якщо такі випадки мали місце (час на відновлення головних функцій ОКІ за тимчасовою схемою та час на повне відновлення ОКІ);

- наявність, достатність за місткістю та технічний стан укриттів для особового складу та працівників ОКІ;

- наявність запасних частин та ремонтних комплектів, сил та засобів для оперативного відновлення і заміни елементів ОКІ та конструкцій споруд ІЗ;

- наявність дублювання пунктів керування у окремих захищених спорудах;

- стан фізичного захисту периметра, якість організації та функціонування блокпостів, убезпеченість ОКІ від можливих терактів, у тому числі від застосування автомобілів із вибухівкою, застосування стрілецької зброї, займистих речовин, дронів-квадрокоптерів тощо;

- наявність і технічний стан протипожежних систем, час спрацювання та ефективність при можливих факторах ураження ЗПН противника.

Удосконалення систем ІЗ передбачає їх перебудову та науково-конструкторські пошуки для підвищення рівня і ступеня захищеності, заміну на більш сучасні та новіші конструкції, системи, що ураховують сучасні дані щодо факторів ураження ЗПН противника.

Під час реконструкції та ремонту існуючих систем ІЗ першого рівня, зокрема, рекомендовано:

- замінити захист із бігбегів, мішків із піском та бетонних блоків на більш надійні системи захисту із габіонів, заповнених піском (піском із щебеним відсівом) або аналогічні за ефективністю конструкції;

- споруджувати габіонні захисні конструкції у можливих незахищених місцях (на кутах, у просвітах тощо), для створення рівномірного захисту;

- збільшувати висоту існуючих габіонних конструкцій їх добудовою з урахуванням рекомендацій компанії “Hesco” (Велика Британія) [46], та технологічних зазорів до дротів, обладнання і відповідно до вимог електротехнічної безпеки (рис. 6.18).

Зрештою, для удосконалення, необхідний поступовий перехід від першого до другого рівня захисту та надалі, до третього рівня захисту елементів ОКІ.

В усіх випадках слід передбачати вирівнювання потенціалів і заземлення конструкцій інженерного захисту, блискавкозахист; необхідні заходи із вогнезахисту та пожежної техногенної безпеки.



Рис. 6.18. Приклад принципової схеми перерізу пропонованого збільшення висоти захисної конструкції першого типу захисту із використанням габіонів для окремо розташованого обладнання

Для введення противника у оману можливо приховувати свої переваги, або навпаки, перебільшувати їх. Приховувати переваги – це заходи із маскуванню та улаштування хибних цілей. Для систем захисту слід передбачати спеціальні інженерні заходи із маскуванню нового обладнання й устаткування, у тому числі у тепловому спектрі: захисне пофарбування, накриття маскувальними сітками (для споруд першого, другого рівня); засадження обсіпки травою, кущами (для споруд третього рівня). Постановка кутикових відбивачів, макетів, згорілої техніки під виглядом робочої, прокладання хибних шляхів, ліній електропередач тощо – додаткові заходи із введення противника в оману, які можуть врятувати елементи ОКІ у ході розвідки і вибору противником цілей та безпосередньо під час повітряної атаки. Для протидії оптико-електронним засобам наведення ракет противника рекомендовано використовувати засоби маскуванню, переміщувати критичні елементи якомога далі від їх початкового, відомого місця знаходження. Для протидії інфрачервоним засобам наведення ракет противника рекомендовано використовувати спеціальні димові завіси, захисні мультиспектральні екрани тощо. Ці заходи мають бути вжиті ще на етапі підготовки майданчику та будівництва. Перебільшувати переваги, якщо їх неможливо приховати, належить до питань інформаційної політики та стратегічних комунікацій, тобто поширення навмисної інформації щодо абсолютної захищеності 100% кількості ОКІ з відповідними наративами та контентом, призначеними для противника, який через такі дії може відмовитися від задумів атакувати ОКІ, або намагатися нарощувати надлишковий бойовий потенціал, витрачаючи на це додаткові ресурси.

Перспективні наукові дослідження в майбутньому варто спрямувати на розроблення типових технічних рішень для захисту спеціалізованих ОКІ та їх елементів, на уточнення технологічних вимог та особливостей проектування, на натурні експерименти із уточнення захисних товщ споруд та їх складових.

ПІСЛЯМОВА

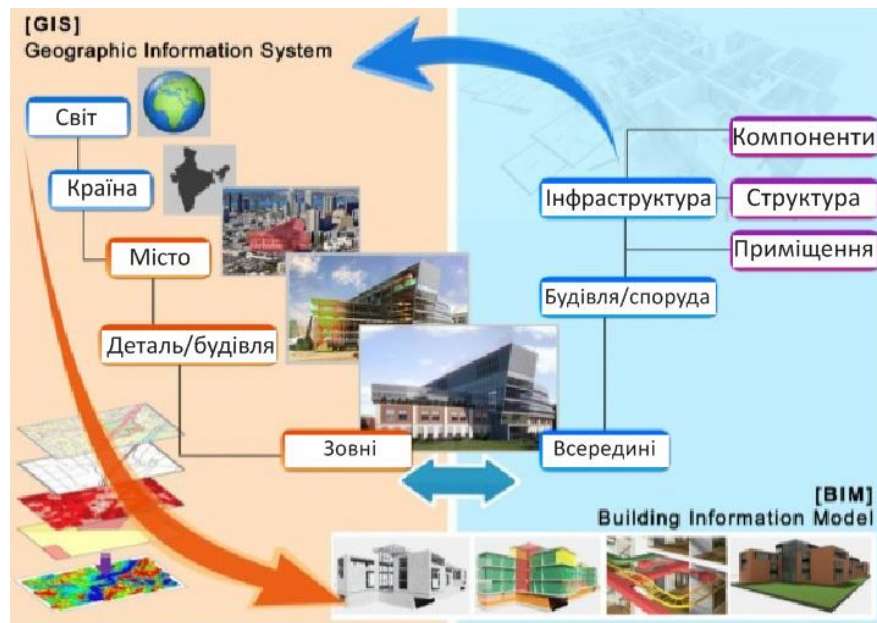
Представлена монографія охоплює лише частину інженерних аспектів захисту ОКІ від факторів ураження ЗПН, що належать до енергетичної галузі України. Монографія написана під час повномасштабної фази війни, тож цілком можливо, що на момент її виходу друком деякі дані, відомості будуть вже застарілі. Проте самі принципи, методики розрахунків, проілюстровані у роботі, є застосовувані для оцінювання загроз та критичності елементів ОКІ, встановлення головних конструктивних параметрів споруд та порівняльного аналізу у ході прийняття рішень із вибору найліпшого варіанта інженерного захисту.

Основними проблемами, які на час написання книги лишаються у сфері захисту ОКІ енергетичної галузі від факторів ураження ЗПН противника, є:

- нарощування противником, незважаючи на міжнародні санкції, потужностей виробництв та відповідно кількості ЗПН у атаках на ОКІ енергетичної галузі України;
- низька передбачуваність технологічного розвитку і вдосконалення ЗПН противника, а відтоді і дії факторів ураження;
- складність прогнозування дій противника та відповідно вимог до споруд інженерного захисту ОКІ;
- значна централізація і концентрація ОКІ енергетичної галузі України, складність заміщення ОКІ або їх поодиноких елементів через зав'язаність на інших видах інфраструктурної мережі у державі.

Перспективою подальшого розвитку галузі захисту ОКІ України є зокрема цифровізація інфраструктури, яка включає в себе: побудову єдиної комп'ютерної моделі інфраструктури за рахунок залучення BIM-технологій (Building Information Modelling) і оцифрування ОКІ [8] шляхом лазерного сканування; поєднання з геоінформаційними (ГІС)-системами. Це дозволить точніше прогнозувати наслідки ураження ОКІ, вчасно підсилювати та планувати застосування систем інженерного захисту, аналізувати і цілеспрямовано підвищувати їх ефективність. Перспективним напрямком розвитку концепції “Країна-фортеця” є організація спеціальної інформаційної системи, яка буде розглядати динамічно параметри ОКІ, зокрема їх категорії критичності, що дозволить проектувати та обґрунтовувати ефективні технічні рішення інженерного захисту (рис. 6.19).

Отже, ширше застосування систем підтримки прийняття рішень на основі комп'ютерного аналізу єдиної мережі ОКІ, застосування моделей оцінювання втрат ЖЦ – може дозволити точніше встановлювати та прогнозувати втрати після ураження ЗПН противника і визначати напрями для галузей, державної системи вцілому, у тому числі ощадніше проектувати інженерний захист відповідного рівня та розміщення.



а



б

Рис. 6.18. Перспективна інтеграція BIM та ГІС (а) [47], майбутні очікувані технології у сфері спорудження інженерних систем, в тому числі захисту ОКІ (б) [48]

У світі для оцінювання ОКІ вже використовують розширені інструменти ризик-орієнтованого підходу, такі як динамічні моделі введення-виведення (витрат-виходів) непрацездатності Input-Output (DIIM), нейромережі тощо. Непрацездатність при цьому визначають, як інтегральний параметр пропорційного ступеня порушення функціональності інфраструктури відносно її ідеальної роботи [37, 38, 39]. Так встановлено, що з погляду на економічні втрати, при ураженні енергетичної інфраструктури, найбільше страждає виробничий сектор, тому що він не тільки значною мірою залежить від електроенергії, а й має найбільший внесок у ВВП [40].

Електротранспорт, як то метро, трамваї, тролейбуси – важливий для великих міст, окрім того зростає частка приватного електротранспорту. Прикладом є перебої у русі метро, введення автобусних маршрутів замість трамваїв та тролейбусів у найбільших містах України взимку 2022 року. Вже розвинуті і продовжують удосконалюватися автоматизовані системи контролю і керування рухом та перевезеннями. Ефективна логістика стає все більш залежною від електроенергетики, а логістика – запорука воєнних успіхів. У разі виникнення будь-якої серйозної відмови або кризи відновлення ОКІ є життєво важливим для сприяння регенерації економічних секторів, оскільки ключові галузі – електроенергія, вода, телекомунікації та транспорт, не мають негайної заміни [41]. На додаток до скорочення часу на відновлення, підвищення стійкості секторів критичної інфраструктури може зменшити загальні економічні втрати [42]. Хоча підвищення стійкості може призвести до втрати ефективності, сучасні погляди [43] виступають за збалансування цих двох аспектів для поліпшення суспільного добробуту.

Вибір раціональних споруд та конструкцій інженерного захисту ОКІ за допомогою критеріїв ЖЦ не тільки дозволяє зберегти кошти для ліпшого устаткування ОКІ, активних систем прикриття та інших заходів оборони, а й сприяє досягненню цілей сталого розвитку, що дає економічні та технологічні переваги у довгостроковій перспективі.

Таким чином, концепція “Країна-фортеця” зрештою, має реалізовувати засади кругової економіки [8] – економічної системи, спрямованої на зменшення утворення відходів і викидів вуглецю, а також зменшення застосування природних ресурсів за рахунок повторного використання матеріалів. Подальшим розвитком оцінювання ефективності інженерного захисту ОКІ є також екологічне оцінювання рішень за критеріями ЖЦ [8, 13]. Зокрема, у вже згаданій вище Настанові ДСТУ 9171 [13] наведені критерії раціонального використання природних ресурсів у ході реконструкції будівель і споруд, у тому числі захисних. Три складові сталого розвитку – екологічна, соціальна та економічна, є необхідними елементами системного підходу для визначення стійкості використання і розвитку методів будівництва. Також у ДСТУ 9171 присутня методика обчислення екологічного оцінювання ЖЦ, яка придатна в тому числі для ОКІ енергетичної галузі, і базується на суперкритерії приєднаного вуглецю. Для початкового аналізу рекомендований орієнтовний допустимий діапазон приєднаного вуглецю може бути взятий для споруд другого рівня захисту – 450..950 кг CO²/м², а для споруд третього рівня захисту – 550..1000 кг CO²/м².

Окремо в складі втрат слід враховувати непрямі збитки, у тому числі від неотримання екосистемних послуг [44]. Для прикладу, екологічна катастрофа світового масштабу після руйнування противником дамби Каховської ГЕС у 2023 році показала вкотре вразливість незахищених великих надземних, централізованих ОКІ. За експертними оцінками, на відновлення Каховської ГЕС після перемоги необхідно не менше 10 років, що також вказує на низьку ремонтпридатність складних об’єктів енергетичної інфраструктури до

факторів небезпеки воєнного часу. Прямі втрати при цьому оцінені не менше як 1,5 млрд дол., а непрямі – понад 10 млрд дол. [45].

На час написання цієї книги концепція “Країна-фортеця” була затверджена на державному рівні Міністерством енергетики, а Типові рішення із інженерного захисту, розроблені за участю авторів – були розглянуті та схвалені до застосування Кабінетом Міністрів України. Цікаво, що ряд незалежних програм в Україні також дійшли до семантики фортеці як символу організованої системної захищеності (рис. 6.20).



Рис. 6.20. Логотип програми “Країна-Фортеця”, логотип програми “Моя маленька фортеця” для укриттів цивільного захисту шкіл та логотип стратегії НБУ “Фінансова фортеця”, які було розроблено незалежно у 2023 році

Вбачається, що повна реалізація запропонованої концепції “Країна-фортеця” сприятиме:

- формуванню єдиного державного системного підходу до інженерного захисту ОКІ;
- налагодженню ефективної взаємодії між усіма суб’єктами інженерного захисту ОКІ енергетичної галузі;
- виробленню єдиного механізму організації заходів інженерного захисту, проєктування та будівництва відповідних споруд із врахуванням технологічних вимог енергетичної галузі;
- поетапному переходу до інженерного захисту критичної інфраструктури з підземною урбанізацією та пристосуванням технологій відповідних виробничих процесів;
- мінімізації наслідків масованих ударів ЗПН противника по ОКІ;
- забезпеченню стійкого функціонування енергетичної системи України в умовах зовнішніх загроз та дій противника.

Очевидно, інтегральною відповіддю на загрози є як посилення систем ППО та інженерного захисту ОКІ, так і диверсифікація енергетичної галузі, децентралізація та її системний перехід на розподілені та наближені до розташування споживачів відновні джерела енергії. Це дозволить “розмити” енергетичну галузь по досить великій території України, що зробить беззмисловими атаки ЗПН противника, а саму галузь – менш вразливою. Захищена, екологічна енергетична галузь – це не тільки важлива складова перемоги, а й ключ до відбудови України як оборонної демократії нового типу, країни сталого розвитку, готової до серйозних викликів майбутнього.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ:

До Вступу та Розділу 1

1. Залужний В., Забродський М. Перспективи забезпечення воєнної кампанії 2023 року: український погляд/ УКРІНФОРМ, URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/3566162-ak-zabezpeciti-voennu-kampaniu-u-2023-roci-ukrainskij-poglad.html> Дата звернення 07.09.2022.
2. Коваль М.В., Коваль В.В., Коцюруба В.І., Білик А.С. Організаційно-технічні засади побудови системи інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури енергетичної галузі України // “Наука і оборона”, 2023 – С.11-16
3. Коцюруба В.І. Білик А.С. Концепція “Країна-фортеця” як складова національної безпеки України/ Тези доповідей, 2023. – С.52-53
4. Коцюруба В.І. Білик А.С. Основні принципи фізичного захисту об'єктів критичної інфраструктури України згідно концепції “Країна-фортеця” /Тези доповідей – Львів, 2023 – С.9-10
5. Білик А.С. Коцюруба В.І. Концепція національної безпеки України “Країна-фортеця” в ракурсі захисту критичної інфраструктури / Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції, Тези доповідей, 2023. – С.16-17
6. Україна та США готують спільну програму співпраці з декарбонізації та сталості української енергетики. URL: <https://mind.ua/news/20255869-ukrayina-ta-ssha-gotuyut-spilnu-programu-spiivpraci-z-dekarbonizaciyi-ta-stalosti-ukrayinskoyi-energetik>. Дата звернення 01.09.2023.
7. Структура електрогенерації в Україні та її зв'язок із тарифами на електроенергію. URL: <https://tek.energy/news/struktura-elektrogeneratsii-v-ukraini-ta-ii-zvyazok-iz-tarifami-na-elektroenergiyu>. Дата звернення 01.09.2023.
8. Україна у 2021 році збільшила виробництво електроенергії на 5,2%, споживання – на 5,7% – огляд. URL: <https://ua.interfax.com.ua/news/greendeal/790844.html>. Дата звернення 01.09.2023.
9. ДТЕК запустив першу в Україні промислову систему накопичення енергії. URL: <https://dtek.com/media-center/news/dtek-zapustil-pervuyu-v-ukraine-promyshlennuyu-sistemu-nakopleniya-enerгии/>. Дата звернення 01.09.2023.
10. Проведення II Всеукраїнського Енергетичного з'їзду - шлях до відновлення та розвитку енергетичної галузі України. URL: https://lb.ua/blog/ivan_plachkov/550605_provedennya_ii_vseukrainskogo.html. Дата звернення 01.09.2023
11. Українська нафтогазова енциклопедія / за заг. ред. В. С. Іванишина. – Львів: Сполом, 2016. – 603 с.
12. Газотранспортна система України. URL: <https://gaszbut.com.ua/blog/gazotransportna-sistema-ukraini>. Дата звернення 01.09.2023
13. Газотранспортна система України – огляд. URL: <http://ukrexport.gov.ua/ukr/prom/ukr/19.html>. Дата звернення 01.09.2023.
14. 3 історії нафтогазової промисловості України. URL: <https://www.naftogaz.com/history-of-the-industry>. Дата звернення 01.09.2023.
15. Збитки енергетики України наближаються до критичної точки, – Єврокомісар – 11/2022. URL: <https://fakty.ua/410930-ucsherb-energetike-ukrainy-priblizhaetsya-k-kriticheskoy-tochke---evrokomissar>. Дата звернення 01.09.2023.
16. Електростанція тепла // Універсальний словник-енциклопедія. – 4-те вид. – К. : Тека, 2006. – 1432 с.
17. Справочник по проектированию электрических сетей / Под редакцией Д. Л. Файбисовича. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 376 с.

18. Шмиг Р. А., Боярчук В. М., Добрянський І. М., Барабаш В. М.; за заг. ред. Шмига Р. А. Інфраструктура // Термінологічний словник-довідник з будівництва та архітектури – Львів, 2010. – С. 104.
19. Airpower and Globalization Effects: Rethinking the Five Rings / URL: <https://ndupress.ndu.edu/Publications/Article/577506/airpower-and-globalization-effects-rethinking-the-five-rings>. Дата звернення 01.09.2023.
20. Україні Закон “Про критичну інфраструктуру”. Редакція від 05.12.2022 / URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text>. Дата звернення 01.09.2023.
21. Закон України “Про основні засади забезпечення кібербезпеки України” від 5 жовтня 2017 року / URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2163-19>. Дата звернення 01.09.2023.
22. Карта ударів по українській енергосистемі / URL: <https://texty.org.ua/fragments/108481/karta-udariv-po-ukrayinskij-enerhosystemi>. Дата звернення 01.09.2023.
23. Бірюков Д. С. Захист критичної інфраструктури: проблеми та перспективи впровадження в Україні / Д. С. Бірюков, С. І. Кондратов. – К. : НІСД, 2012. – 96 с.
24. Lewis, T. G. Critical infrastructure protection in homeland security: defending a networked nation. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. – 474 p.
25. Постанова КМУ від 9 жовтня 2020 р. № 1109 Деякі питання об’єктів критичної інфраструктури. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/1109-2020-%D0%BF#n89>. Дата звернення 01.09.2023.
26. Наказ № 23 від 15.01.2021 Адміністрації державної служби спеціального зв’язку та захисту інформації України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0023519-21#n10>. Дата звернення 01.09.2023.
27. Постанова КМУ від 27 грудня 2022 р. № 1482 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1482-2022-%D0%BF#Text>. Дата звернення 01.09.2023.
28. Єрменчук О.П. Основні підходи до організації захисту критичної інфраструктури в країнах Європи: досвід для України: монограф. / О. П. Єрменчук. – Дніпро: Дніпроп. держ. ун-т внутр. справ, 2018. – 180 с.
29. National Research Council 1998. Use of Underground Facilities to Protect Critical Infrastructures: Summary of a Workshop. Washington, DC: The National Academies Press. URL: <https://doi.org/10.17226/6285>. Дата звернення 01.09.2023.
30. ДБН В.1.2-14:2018 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об’єктів. Загальні принципи. – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2018. – 36 с.
31. Bennett, Brian T. (2007). Understanding, assessing, and responding to terrorism: protecting critical infrastructure and personnel (2007 ed.). John Wiley & Sons. ISBN 978-0-471-77152-4. – 466 p.
32. Gaijinass (March 11, 2010). “CARVER Matrix: Tactical Target analysis”. gaijinass. Retrieved March 23, 2010. URL: <http://gaijinass.wordpress.com/2010/03/11/carver-matrix-tactical-target-analysis>. Дата звернення 01.09.2023.
33. Горбенко В.М., Коршець О.А., Королюк Н.О., Оцінювання можливих механізмів досягнення російською федерацією політичних цілей в Україні з використанням концепцій стратегічного паралічу та операцій на основі ефектів / Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил, 2020, № 1(63) – С. 113-123.

До Розділу 2

1. Животовський Р. М., Шинкарук О. М., Яковлев М. Ю., Варсегов А. С., Аналіз крилатих ракет повітряного базування РФ у війні проти України 2022 року. – URL: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.1\(33\)](https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.1(33)) Дата звернення 01.09.2023.
2. Тимофеев И. Авиационные крылатые ракеты: кто впереди? – URL: <https://dfnc.ru/popular1/aviatsionnye-krylatyerakety-kto-vperedi>. Дата звернення 01.09.2023.
3. Іскандер, Калібр, серія Х. Якими ракетами Росія б'є по Україні. 7.7.2022р. URL: <https://www.rbc.ua/ukr/news/iskander-kalibr-seriya-h-kakimi-raketami-1657117961.html>. Дата звернення 01.09.2023.
4. Missiles of Russia 10.8.2021 URL: <https://missilethreat.csis.org/country/russia>. Дата звернення 01.09.2023.
5. Мануйленко В.Г., Удин Е.Г., Теоретические основы крылатых управляемых ракет – СПб: Университет ИТМО, 2020. – 201 с.
6. Forss S. The russian operational-tactical Iskander missile system / National Defence University, Department of strategic and defence studies; Series 4: working papers #42, Helsinki 2012 – 26 p.
7. Україна під обстрілом російських ракет: чим забезпечити захист (аналіз). 7.4.2022р. URL: https://defence-ua.com/weapon_and_tech/ukrajina_pid_obstrilom_rosijskih_raket_chim_zabezpechiti_zahist_analiz-6772.html. Дата звернення 01.09.2023.
8. Що росіяни ховають у “Кинджалах”: експерт зганьбив “гіперзвукову” зброю РФ. – URL: <https://www.unian.ua/weapons/shcho-rosiyani-hovayut-u-kindzhalah-rf-progovorilasya-pro-nachinku-analogiv-raket-12253125.html>. Дата звернення 01.09.2023.
9. Harlin W.J., Cicci David A. Ballistic missile trajectory prediction using a state transition matrix / Applied Mathematics and Computation 188 (2007) - P.1832-1847.
10. Сказание об “Искантере”, или Как работает тактический ракетный комплекс /2021 URL: <https://naked-science.ru/article/tech/raketa-iskander>. Дата звернення 01.09.2023.
11. Лист Генерального штабу Збройних сил України, №300/1/С/6004 від 15.05.2023. Характеристики засобів повітряного нападу противника (ракет та БпЛА типу “баражуючий боеприпас”).
12. Likely Shahed-136 UAS Technical Report/ FIT UK secret rel Ukraine. – 10 p.
13. “Suicide Drones” Linked to Iran - URL: <https://www.newsweek.com/suicide-drones-linked-iran-have-made-their-way-yemen-rebels-photos-suggest-1628204>. Дата звернення 01.09.2023.
14. Lessons of the Russian-Ukrainian war of 2022: military aspects (Information and analytical materials. Report No. 24) Analysis of the experience of using Iranian-made unmanned aerial vehicles in the Russian-Ukrainian war and recommendations for combating them 03/19/2022 No. 6131 – 69 p.
15. Honeycomb Nomex (product specification) – URL: <http://ua.haxcorematerial.com/honeycomb-core/nomex-honeycomb/nomex-honeycomb-core.html>. Дата звернення 01.09.2023.
16. Glass filament fabrics for plastics reinforcement (product specification) - URL: <https://www.swiss-composite.ch/pdf/t-Glas-105g-Koeper-91111-e.pdf>. Дата звернення 01.09.2023.
17. Informational and analytical material on the use of unmanned aerial systems of the Russian Federation Shahed-136 (“Geraniun-2”), Shahed-129 and Mohajer-6. (confirmed Deputy Head of the General Staff of the Armed Forces of Ukraine 09/29/2022) Kyiv. Military unit A4629. – 18 p.
18. Multipurpose Iranian drone warheads used in Ukraine 2-2023 – URL: <https://storymaps.arcgis.com/stories/f5070c1d8ff8451c9a99138a3b70232d>. Дата звернення 01.09.2023.

19. Dissecting Iranian drones employed by Russia in Ukraine 11-2022 - URL: <https://bulgarianmilitary.com/2022/09/23/confirmed-russia-uses-swarming-shahed-136-loitering-munition>. Дата звернення 01.09.2023.

20. Технічний опис “Шахедів” з польського часопису Wojsko i Technika. URL: https://atez72.blogspot.com/2023/03/blog-post_68.html?fbclid=IwAR2efQEYW9ITpHyzZskWs_dFsrkAt9PLS3nSdetiakCVz8NFukinMFoPErU&m=1. Дата звернення 01.09.2023.

21. Залужний показав карту польоту ракет, які російські окупанти запускали 10 жовтня. URL: <https://amp.donpatriot.news/zaluzhnyi-pokazav-kartu-polotu-raket-iaki-rosijski-okupanty-zapuskaly-10-zhovtnia>. Дата звернення 01.09.2023.

22. Російський ВПК нарощує оберти. Звідки гроші та хто допомагає РФ будувати ракети? URL: <https://www.epravda.com.ua/publications/2023/05/29/700580>. Дата звернення 01.09.2023.

23. Скільки ще “Шахідів” має росія і чому не можна сповіщати про роботу ППО? URL: <https://rudana.com.ua/news/skilky-shche-shahidiv-maye-rosiya-i-chomu-ne-mozhna-spovishchaty-pro-robotu-pro>. Дата звернення 01.09.2023.

24. Де росія бере “Шахе́ди”. Інтерв’ю з розслідувачем, який викрив фабрику у Татарстані. URL: <https://glavcom.ua/interviews/de-rosija-bere-shakhedi-intervju-z-rozsliduvachem-jakij-vikriv-fabriku-u-tatarstani-940376.html>. Дата звернення 01.09.2023.

До Розділу 3

1. Harle, J.C. (1994). The art and architecture of the Indian subcontinent (2nd ed.). Harmondsworth, Middlesex, England: Penguin Books – 40 p.

2. Li L. H., Yang Z. F., Yue Z. Q., Zhang L. Q. Engineering geological characteristics, failure modes and protective measures of Longyou rock caverns of 2000 years old. // Journal “Tunnelling and underground space technology”, 2009, vol. 24, no2, pp. 190-207.

3. Dunn C. Lost technologies of ancient Egypt advanced engineering in the temples of the pharaohs, 2010. – 400 p.

4. Білик А.С. Коваленко Є.Ю. Петров С.О. Трибологічний і хімічний аналіз зразків обробленого базальту із комплексу Варангал у Індії та гіпотетичні можливості технологій прадавніх цивілізацій // Аномальні явища: методологія і практика досліджень: зб. наук. праць / під заг. ред. А.С. Білика. – К.: Знання, 2020. С.147-165.

5. Э.Д.Фролов. Рождение греческого полиса. Издание второе. СПб.: Издат. дом СПбГУ, 2004. – 266 с.

6. Jean-Pierre Panouillé, Carcassonne: histoire et architecture, Rennes: Ouest-France, 1999, ISBN 978-2-7373-2194-8, p. 7.

7. National Research Council 1998. Use of Underground Facilities to Protect Critical Infrastructures: Summary of a Workshop. Washington, DC: The National Academies Press. URL: <https://doi.org/10.17226/6285>. Дата звернення 01.09.2023.

8. President’s Commission on Critical Infrastructure Protection, Critical Foundations: Protecting America’s Infrastructures, Report, October 1997, P. 9-10

9. Linger D. A., Baker G.H., Little R.G. Applications of Underground Structures for the Physical Protection of Critical Infrastructure / North American Tunneling 2002, Ozdemir (ed.) © 2002.

10. Underground power station – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Underground_power_station. Дата звернення 01.09.2023.

11. State Grid of China switches on world’s largest pumped-hydro station – URL: <https://www.pv-magazine.com/2022/01/04/state-grid-of-china-switches-on-worlds-largest-pumped-hydro-station>. Дата звернення 01.09.2023.

12. Єрменчук О.П. Основні підходи до організації захисту критичної інфраструктури в країнах Європи: досвід для України: монограф. / О. П. Єрменчук. – Дніпро: Дніпроп. держ. ун-т внутр. справ, 2018. – 180 с.
13. Рогозін А.С., Росоха О.М. Методичні рекомендації до самостійної роботи, проведення практичних занять із дисципліни “Інженерний захист населення та території” / – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2018. – 77 с.
14. Трофіменко П.Є., Сорокоумов Г.В., Демідко Л.С. Основи інженерної підготовки, тактичного маскування та радіаційного, хімічного і біологічного захисту в артилерійських підрозділах: підручник. – Суми: СумДУ, 2021. – 266 с.
15. J.Nagel, J.Schanzer. Assessing Israel’s Iron Dome Missile Defense System / FDD, November 13, 2019 – URL: <https://www.fdd.org/analysis/memos/2019/11/13/assessing-israels-iron-dome-missile-defense-system>. Дата звернення 01.09.2023.
16. Коцюруба В.І. Білик А.С. Основні принципи фізичного захисту об’єктів критичної інфраструктури України згідно концепції “Країна-фортеця” /Тези доповідей – Львів, 2023 – С.9-10
17. Білик А.С. Коцюруба В.І. Концепція національної безпеки України “Країна-фортеця” в ракурсі захисту критичної інфраструктури / Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції, Тези доповідей, 2023. – С.16-17
18. Методичні рекомендації щодо інженерного захисту основних елементів окремих об’єктів критичної інфраструктури енергетичної галузі (ГЕС-ГАЕС, ТЕС, підстанцій ПС330 кВ, ПС750 кВ, газотранспортних систем) України від ураження засобами повітряного нападу противника Генеральний Штаб Збройних Сил України, 4 видання, уточнене та доповнене КИЇВ – 2023. – 50 с.
19. FM 5-103: Survivability, 1985. – 257 p.
20. Постанова Кабінету Міністрів України № 929 від 29.08.2023р. “Про схвалення типових рішень з інженерного захисту критичних елементів об’єктів критичної інфраструктури України від ураження засобами повітряного нападу противника” – 2с.
21. HESCO Construction Guide v2, 2011. – 160 p.
22. Blast Effects on Buildings / D. Cormie, G.Mays, P. Smith ICE Publishing, 2020 – 335 p.
23. Коцюруба В.І., Білик А.С. та ін. Методика розрахунків та обґрунтування вимог до інженерного захисту об’єктів критичної інфраструктури від БпЛА типу баражуючий боеприпас/ Опір матеріалів і теорія споруд/Strength of Materials and Theory of Structures. 2022. № 109 – С.164-183.
24. Underground Space Planning R.K. Goel, ... Jian Zhao, in Underground Infrastructures, 2012 - URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/underground-space>. Дата звернення 01.09.2023.
25. Білик А.С. Сталь у реконструкції будівель – К.: УЦСБ, 2018 – 176 с.
26. ДБН В.1.2-14:2018 “Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд” із змінами. – 36 с.

До Розділу 4

1. ДСТУ 8768:2018 “Двотаври сталеві гарячекатані. Сортамент”. – 8 с.
2. Equation of State and Strength Properties of Selected Materials. Steinberg D.J. LLNL. Feb 1991 – 11p.
3. LA-4167-MS. May 1 1969. Selected Hugoniot: EOS 7th Int. Symp. Ballistics. Johnson + Cook. – 13p.

До Розділу 5

1. ДБН В.1.2-14:2018 “Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд” із змінами. – 36 с.
2. ДБН В.1.2-2:2006 “Навантаження і впливи. Норми проектування”. – 75 с.
3. Білик А. С. Порівняння методів розрахунку металевих каркасів висотних будівель на одиничну живучість / А. С. Білик, А. І. Коваленко // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського, 2015. - Вип. 16. – С. 30-39.
4. ДБН В.1.1-7:2016 “Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги”. – 47 с.
5. ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 “Захист від пожежі. Вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій”. – 9 с.
6. Балаганский И.А., Мержиевский Л.А. Оценка воздействия ударных волн. Действие средств поражения и боеприпасов. Новосибирск: НГТУ, 2004. – С. 216.
7. Гордеев В.Н., Лантух-Лященко А.И., Пашинский В.А., Перельмутер А.В., Пичугин С.Ф. Воздействие промышленных взрывов. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения. Справочное пособие. Издательство Ассоциации Строительных Вузов, 2007. – С. 390.
8. Наставление для инженерных войск ПФ-43 .Ч.2. 1946. – 363 с.
9. Linger D. A., Baker G.H., Little R.G. Applications of Underground Structures for the Physical Protection of Critical Infrastructure / North American Tunneling, Ozdemir (ed.) – 2002. – 7 p.
10. Бирбраер А. Н. Экстремальные воздействия на сооружения /А. Н. Бирбраер, А. Ю. Роледер. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 594 с.
11. IATG 01.80 Formulae for ammunition management / 2021. URL: <https://data.unsafeguard.org/iatg/en/IATG-01.80-Formulae-ammunition-management-IATG-V.3.pdf>. Дата звернення 01.09.2023.
12. Учебник сапера. – “Воениздат”, 2001 – 78 с.
13. П.Н. Дерябин, М.Н. Краснов, А.А.Ганин. Индексация и маркировка боеприпасов артиллерии: Учебное пособие/П. Н. Дерябин, М. Н. Краснов, А.А. Ганин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Пенза: ПАИИ, 2004. – 45 с.
14. Kaufmann; et al. (2004). “Ballistic Performance of Monoblock and Jacketed Medium-Caliber Penetrators against Composite Armor and Spaced Targets”. Armor and Impactor Studies. – 9 p.
15. Бісик С.П., Миронов Я.А. Дослідження взаємодії бойової частини гранати РПГ із захисним протикумулятивним екраном / The scientific heritage. № 71 (2021) – С. 34-40.
16. Е.Е. Невская, Е.В. Глебова та ін. Разработка модели защитного барьера для снижения взрывной нагрузки от ударной волны на здания и сооружения / Безопасность Труда в Промышленности /Occupational Safety in Industry, № 8'2019. – С. 6.
17. В.А. Горев, Н.В. Тюрин. Защита зданий от взрыва с помощью перфорированного экрана / Пожаровзрывобезопасность. 2/2005. – С.33-37.
18. Коцюруба В.І., Білик А.С. та ін. Методика розрахунків та обґрунтування вимог до інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури від БпЛА типу баражуючий боеприпас/ Опір матеріалів і теорія споруд/Strength of Materials and Theory of Structures, 2022. № 109. – С.164-183.
19. Buildings and Infrastructure Protection Series /Preventing Structures from Collapsing to Limit Damage to Adjacent Structures and Additional Loss of Life when Explosives Devices Impact Highly Populated Urban Centers BIPS 05/June 2011. URL: <https://www.dhs.gov/xlibrary/assets/preventing-structures-from-collapsing-062011.pdf>. Дата звернення 01.09.2023.

20. Б.А. Эпов. Основы взрывного дела. – М.: Воениздат, 1974. – 222 с.
21. Эффективность ракетных комплексов: учебное пособие. Кн. 2 / С.Н. Ельцин. Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2018. – 117 с.
22. ДСТУ 2251:2018 “Кутики сталеві гарячекатані рівнополічні”. – 13 с.
23. ДБН В.2.6-198:2014 “Сталеві конструкції. Норми проектування”. – 205 с.
24. Білик А.С. Оптимальний вибір конструкцій з дискретно змінною схемою навантаження /Зб. наукових УІСК ім. В.М. Шимановського. – Випуск 14, 2014. – С.70-78.
25. Білик А. С. Вибір оптимальних конструктивних рішень сталевих ферм покриттів: автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 /Білик Артем Сергійович; Київ. нац. ун-т буд-ва та архіт. – К., 2009. – 21 с.
26. Excel Solver - algorithms and methods used. URL: <https://www.solver.com/excel-solver-algorithms-and-methods-used>. Дата звернення 01.09.2023.

До Розділу 6 та Післямови

1. І.В. Кочін, О.М. Акулова та ін. Ризик-орієнтований підхід – основа організації безпеки складних технічних систем, контроль за їх діяльністю та запобігання виникнення техногенних надзвичайних ситуацій. URL: <http://old.zounb.zp.ua/node/1247>. Дата звернення 01.09.2023.
2. Ткач С. М. Управління ризиками інвестиційної діяльності в регіоні: теоретичні основи та прикладні аспекти: монографія / С. М. Ткач. – Львів: ДУ “Інститут регіональних досліджень імені М. І. Долишнього НАН України”, 2015. – 234 с.
3. Paté-Cornell, E. (2002). Finding and fixing systems weaknesses: Probabilistic methods and applications. Risk Analysis, 22(2), 319–334. URL: <https://doi.org/10.1111/0272-4332.00025>. Дата звернення 01.09.2023.
4. Murdock, H. J., De Bruijn, K. M., & Gersonius, B. (2018). Assessment of critical infrastructure resilience to flooding using a response curve approach. Sustainability, 10(10), 3470. URL: <https://doi.org/10.3390/su10103470>. Дата звернення 01.09.2023.
5. Aven, T., Ben-Haim, Y., Andersen, H. B., Cox, T., Droguett, E. L., Greenberg, M., Guikema, S., Kröger, W., Renn, O., Thompson, K., & Zio, E. (2018). Society for risk analysis glossary. URL: <https://www.sra.org/wp-content/uploads/2020/04/SRA-Glossary-FINAL.pdf>. Дата звернення 01.09.2023.
6. Santos J, Ian Daniel K. Roquel Z. et al Assessing the economic ripple effects of critical infrastructure failures using the dynamic inoperability input-output model: a case study of the Taal Volcano eruption / 2022. <https://doi.org/10.1080/23789689.2022.2127999>. Дата звернення 01.09.2023.
7. ДСТУ ISO 14050 “Екологічне управління. Словник термінів”. – 55 с.
8. Білик А.С. Екологічний та економічний аналіз життєвого циклу каркасів будівель: монографія. – К.: УЦСБ, КНУБА, 2022. – 263 с.
9. ДСТУ ISO 14040:2013 Екологічне управління. Оцінювання життєвого циклу. Принципи та структура (ISO 14040:2006, IDT). – 22 с.
10. Донецчина: через російські обстріли на ТЕС впав дах – є загиблий та поранені. URL: <https://www.pravda.com.ua/news/2023/07/8/7410426>. Дата звернення 01.09.2023.
11. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об’єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. – 36 с.
12. ДСТУ ISO 15686-5:20XX. Будівлі та об’єкти нерухомого майна. Планування строку експлуатації. Частина 5. Оцінювання вартості життєвого циклу (ISO 15686-5:2017, IDT). – 101 с.
13. ДСТУ 9171:2021 “Настанова щодо забезпечення збалансованого використання природних ресурсів під час проектування споруд”. – 91 с.

14. Регламент №305/2011 щодо збалансованого використання природних ресурсів
15. Directive 5000.1, "The Defense Acquisition System /DoD USA. URL: <https://www.acq.osd.mil/dpap/Docs/dodd5000-1-chg-1-010401.pdf>. Дата звернення 01.09.2023.
16. E 917-02. An American National Standard: "Standard Practice for Measuring Life-Cycle Costs of Buildings and Building Systems". – 6 p.
17. Билык А., Бурган Б. Сравнительный анализ стоимости многоэтажных коммерческих зданий. – К.: УЦСБ, 2014. – 77 с.
18. Hicks S.J., Lawson R.M., Rackham J.W., Fordham P. Comparative Structure Cost of Modern Commercial Buildings (Sec.Ed.) / SCI P137, 2004. – 85 p.
19. Khajehpour S., Grierson D.E. Profitability versus safety of high-rise office buildings / Struct Multidisc Optim 25, 2003. – P. 279-293.
20. Білик А.С. Вибір оптимальних конструктивних рішень сталевих ферм покриттів – Дисертація ... кандидата технічних наук. – К.: КНУБА, 2009. – 220 с.
21. Koks, E., Pant, R., Thacker, S. et al. Understanding Business Disruption and Economic Losses Due to Electricity Failures and Flooding. Int J Disaster Risk Sci 10, 421–438 (2019). – URL: <https://doi.org/10.1007/s13753-019-00236-y>. Дата звернення 01.09.2023.
22. Koks, E.E., and M. Thissen. A multiregional impact assessment model for disaster analysis. Journal of Economic System Research 28(4), 2016. – P. 429-449
23. Дані підприємних організацій, НАК Укренерго та Державного агентства відновлення та розвитку інфраструктури. – URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3795756-ukraina-otrimala-vid-usaid-armaturu-dla-budivnictva-zahistu-energoobektiv.html>. Дата звернення 11.12.2023.
24. Росія зможе вести війну ще два-три роки – Bild. URL: <https://www.slovoidilo.ua/2023/08/03/novyna/suspilstvo/rosiya-zmozhe-vesty-vijnu-shhe-dva-try-roky-bild>. Дата звернення 01.09.2023.
25. Kemp, R. 2016. Living without electricity: One city's experience of coping with loss of power. London: Royal Academy of Engineering. URL: <https://www.raeng.org.uk/publications/reports/living-without-electricity>. Дата звернення 01.09.2023.
26. A New Approach for Reliable Energy: Underground Substations. URL: <https://www.power-grid.com/td/a-new-approach-for-reliable-energy-underground-substations/#gref>. Дата звернення 01.09.2023.
27. Detailed design and construction supervision of Klong Toey underground-substation/Å Energi. URL: <https://attconsult.com/en/power-engineering/transmission-and-distribution-system-engineering/detailed-design-and-construction-supervision-of-klong-toey-underground-substation>. Дата звернення 01.09.2023.
28. Use of Underground Facilities to Protect Critical Infrastructures: Summary of a Workshop (1998) National Research Council 1998. Use of Underground Facilities to Protect Critical Infrastructures: Summary of a Workshop. Washington, DC: The National Academies Press. – URL: <https://doi.org/10.17226/6285>. Дата звернення 01.09.2023.
29. Tjorhom power station – URL: <https://www.ae.no/en/our-business/hydroelectric-power/our-hydroelectric-power-stations/tjorhom-power-station>. Дата звернення 01.09.2023.
30. UFC 4-023-07 Design to resist direct fire weapons effects / U.S. Army Corps Of Engineers, 2007 – 74 p
31. Закон України "Про публічні закупівлі". – URL: <http://www.dorservice.kiev.ua/node/36>. Дата звернення 01.09.2023.
32. Еволюція законодавства України про публічні та оборонні закупівлі від витоків до сьогодення: нарративний аналіз / URL: <https://coordynata.com.ua/evolucia-zakonodavstva-ukraini-pro-publicni-ta-oboronni-zakupivli-vid-vitokiv-do-sogodenna-narrativnij-analiz>. Дата звернення 01.09.2023.

33. Mannakkara, S.; Wilkinson, S. Build Back Better principles for post-disaster structural improvements. *Struct. Surv.*, 2013. – № 31. – С. 314–327.
34. Rita Der Sarkissian Anas Dabaj et al Evaluating the Implementation of the “Build-Back-Better” Concept for Critical Infrastructure Systems: Lessons from Saint-Martin’s Island Following Hurricane Irma. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/6/3133> Sustainability 2021, 13(6), 3133 <https://doi.org/10.3390/su13063133>. Дата звернення 01.09.2023.
35. ДСТУ ISO 15392:202_(ISO 15392:2019, IDT) “Сталість в будівлях та будівельних роботах. Загальні принципи”. – 35 с.
36. Violette E. “Building Life Cycle” Balancing the Equation of Total Ownership Cost/ With our Clients AIAT Green Day Workshop, 2015. – 32p.
37. Leontief, W. (1936). Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States. *The Review of Economics and Statistics*, 18(3), 105–125. URL: <https://doi.org/10.2307/1927837>. Дата звернення 01.09.2023.
38. Lian, C., & Haimen, Y. Y. (2006). Managing the risk of terrorism to interdependent infrastructure systems through the dynamic inoperability input–output model. *Systems Engineering*, 9(3), 241–258. URL: <https://doi.org/10.1002/sys.20051>. Дата звернення 01.09.2023.
39. Barker, K., & Santos, J. R. (2010). Measuring the efficacy of inventory with a dynamic input output model. *International Journal of Production Economics*, 126(1), 130–143. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092552730900293X?via/3Dihub>. Дата звернення 01.09.2023.
40. Santos J, Ian Daniel K. Roquel Z. et al Assessing the economic ripple effects of critical infrastructure failures using the dynamic inoperability input-output model: a case study of the Taal Volcano eruption / 2022. URL: <https://doi.org/10.1080/23789689.2022.2127999>. Дата звернення 01.09.2023.
41. La Porte, T. M. (2006). Managing for the unexpected: Reliability and organizational resilience. In P. E. Auerswald, L. M. Branscomb, T. M. La Porte, & E. O. Michel-Kerjan (Eds.), *Seeds of disaster, roots of response: How private action can reduce public vulnerability*. Cambridge University Press. – pp. 71–76
42. Baghersad, M., & Zobel, C. W. (2015). Economic impact of production bottlenecks caused by disasters impacting interdependent industry sectors. *International Journal of Production Economics*, 168 (October 2015), 71–80. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.06.011>. Дата звернення 01.09.2023.
43. Trump, B. D., Linkov, I., & Hynes, W. (2020). Combine resilience and efficiency in post-COVID societies. *Nature*, 588(7837), 220–221. URL: <https://doi.org/10.1038/d41586-020-03482-z>. Дата звернення 01.09.2023.
44. Екосистемні послуги. Огляд / О. Василюк, Л. Ільмінська “БФ “Фонд захисту біорізноманіття України”, 2020. – 84 с.
45. Чим може обернутися катастрофа на Каховській ГЕС для екології та сільського господарства. – URL: <https://www.slovoidilo.ua/2023/06/13/infografika/suspilstvo/chym-mozhe-obernutysya-katastrofa-kaxovskij-hes-ekolohiyi-ta-silskoho-hospodarstva>. Дата звернення 01.09.2023.
46. HESCO Construction Guide v2. 2011. – 160 p
47. GIS and BIM: Integrating two of the most disruptive technologies. URL: <https://www.commercialdesignindia.com/insights/6112-gis-and-bim-integrating-two-of-the-most-disruptive-technologies>. Дата звернення 01.09.2023.
48. Beyond Business as Usual: BIM and the Future of Public Works. URL: <https://power.buellcenter.columbia.edu/essays/beyond-business-usual-bim-and-future-public-works>. Дата звернення 01.09.2023.

Додаток 1

Таблиця Д.1.1

Параметри оцінювання елемента ОКІ за методикою CARVER

Бал	Критичність (C)	Доступність (A)	Відновлення (R)	Вразливість (V)	Ефект (E)	Розпізнавання (R)
5	Катастрофічний вплив на функціонування об'єкта. Зупинка роботи об'єкту; без додаткових заходів відновити роботу неможливо	Об'єкт відкритий для відвідання; легко доступний без зусиль. Ділянка легка для проникнення. Охорона не забезпечена	Необхідно більше 1 року на ремонт або заміну. Вартість відновлення більше 200 млн. грн.	Уразливий до нападу широкого профілю зі стрілецької зброї. Спеціальні навички чи інструменти не потрібні	Критичний вплив на інші об'єкти інфраструктури або на діяльність. Об'єкт сильно зв'язаний і критичний для функцій інших. Каскадні відмови неминучі	Легко розпізнається всіма без похибок. Легко впізнати за супутниковими знімками
4	Критичний вплив на функціонування об'єкта. Пошкодження частини обладнання. Падіння виробництва (генерації енергії) до 30%	Для отримання доступу потрібні мінімальні зусилля. Є зовнішня огорожа, але не ведеться відеоспостереження, нема постійних патрулів	3-6 місяців на ремонт або заміну. Вартість відновлення більше 100 млн. і до 200 млн. грн.	Уразливий до спеціалізованої атаки зі стрілецької зброї або від одиночного невеликого заряду вибухової речовини	Великий вплив на інші об'єкти інфраструктури. Кілька інших об'єктів можуть значно постраждати. Значна вірогідність каскадних відмов	Легко розпізнається в більшості випадків з невеликою похибкою. Потрібна дуже обмежена підготовка та розуміння для ідентифікації за допомогою супутникових зображень
3	Значний вплив на функціонування об'єкта. Вплив на основне обладнання не критичний. Падіння виробництва (генерації енергії) до 50%	Потрібні деякі зусилля. Виконані заходи проти зловмисників. Присутня базова безпека периметру, наприклад патрулі, електронна система доступу. Інженерний захист посилено, але базово, на перших поверхах	Необхідно 1-3 місяці на ремонт або заміну пошкодженого обладнання. Вартість відновлення більше 50 млн. і до 100 млн. грн..	Уразливий тільки для факторів непрямого ураження ЗПН типу ракет, або прямих влучань БпЛА, значних зарядів вибухівки або менших, але спеціальних зарядів ВР	Значний вплив. Пов'язані з об'єктом критичні системи також зазнають каскадних відмов	Ціль важко розпізнати вночі чи за поганої погоди, її можна сплутати з іншими цілями чи компонентами цілі; розпізнавання на землі або за допомогою супутникового зображення вимагає певної підготовки

2	Сильний вплив на функціонування об'єкта. Пошкодження деяких додаткових вузлів та агрегатів. Падіння виробництва (генерації енергії) до 75%	Об'єкт важкодоступний для ураження. Периметр об'єкта добре захищений. Загальний рівень заходів безпеки, в тому числі інженерного захисту – виконані на другому або еквівалентному рівні	Відновлення займає біля 24..72 години. Для ремонту та відновлення необхідне залучення професійних установ та організацій	На ціль дуже складно вплинути. Для пошкодження необхідне встановлення кількох спеціалізованих зарядів вибухової речовини або прямих влучань ЗПН типу ракет або БпЛА	Вплив від ураження досить значний. Принаймні одна пов'язана критична система постраждає, але з невеликим шансом каскадних відмов	Ціль важко розпізнати вночі або в погану погоду, навіть на відстані зі стрілецької зброї; її легко сплутати з іншими цілями або компонентами, для розпізнавання потрібна інтенсивна підготовка
1	Лише незначні порушення функціонування об'єкта. Можливе пошкодження другорядного обладнання або збільшений вплив на вторинні наслідки. Падіння виробництва (генерації енергії) до 100%	На об'єкт дуже складно отримати доступ, є декілька бар'єрів воєнізованої охорони. Присутній посилений контроль доступу. Спроба проникнення прісікається вогнем на ураження. Інженерний захист – третього рівня або еквівалентний	Ремонт займає до однієї доби і не потребує спеціальної кваліфікації. Ремонтні комплекти та матеріали легкодоступні і та недорогі, можуть зберігатися готовими на об'єкті	Об'єкт неуразливий до всіх засобів ураження, крім спеціальних дій ЗПН, таких як непоодинокі влучання, особливі бомби тощо	Ефект від ураження мінімальний, не впливає на функціонування інших процесів та об'єктів	Ціль не може бути розпізнана ні за яких умов, окрім залучення спеціалізованих експертів та засобів
0	Елементом нульової критичності слід надавати значення 1 або 0,5, якщо потрібна оцінка CARVER (тобто оцінюється зв'язок критично важливих елементів у контексті з іншими елементами).					

Таблиця Д.1.2

Приклад оцінювання елементів OKI за методикою CARVER для об'єкта-представника "ТЕС"

№ п/п	Опис елемента	C	A	R	V	E	R	IMPACT	LIKELI HOOD	Priority Rating
Електрогенерація										
1	Бойлер	5	2	5	3	5	4	15	9	24
2	Турбіна	5	2	5	3	5	4	15	9	24
3	Генератор	5	2	5	3	5	4	15	9	24
4	Центр управління	5	2	3	3	5	4	13	9	22
5	Трансформатори ТДЦ-400000/330 - 6шт	5	3	5	3	5	5	15	11	26
6	Підстанція розподілу	4	3	4	3	3	5	11	11	22
Водопостачання										
7	Водонасосна станція	3	3	3	3	3	3	9	9	18
8	Станція очищення води	2	3	3	3	3	3	8	9	17
9	Станція хімічної підготовки води	2	2	3	2	3	3	8	7	15
10	Резервуар води	2	3	2	2	2	4	6	9	15
11	Очисні споруди	1	5	1	1	1	5	3	11	14
Паливо										
12	Склад вугілля	3	4	2	2	2	5	7	11	18
13	Бункер для вугілля	3	2	3	3	3	3	9	8	17
14	Кульовий млин	3	1	3	3	4	3	10	7	17
15	Ємність для зберігання мазуту	3	1	3	2	3	5	9	8	17
16	Насос подачі рідкого палива	4	1	2	4	3	4	9	9	18
17	ГРП	4	1	2	3	4	5	10	9	19
18	Компресорна станція повітря	3	1	2	3	3	3	8	7	15
Транспортування відходів										
19	Зовнішнє постачання вугілля	2	4	2	1	3	5	7	10	17
20	Конвеєр подачі вугілля	3	4	2	2	3	4	8	10	18
21	Газопроводи	3	3	2	4	3	5	8	12	20
22	Водопроводи	2	3	2	4	3	4	7	11	18
23	Продуктопроводи	3	2	2	4	3	4	8	10	18
24	Конвеєр переміщення шлаку	1	4	1	1	1	2	3	7	10
Допоміжне пальне										
25	Дизпаливо	1	2	1	3	1	2	3	7	10
26	Водень	2	2	2	3	1	2	5	7	12

Додаток 2
Таблиця Д.2.1

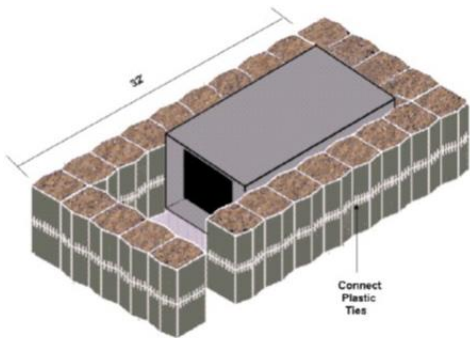
Проектні загрози для ОКІ від ЗПН

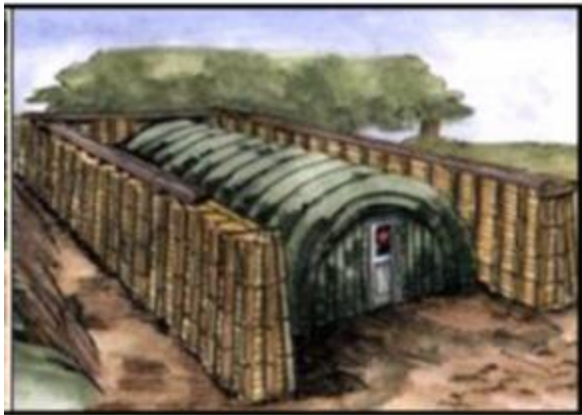
№ п/п	Вид загрози	Властивості загрози	Характеристики загрози
1	Ракетний удар	Велика маса БЧ осколково-фугасної або фугасно-кумулятивної, проникної дії; надвисока швидкість гіперзвукових, зенітних та балістичних ракет; висока точність ураження; можливість ураження об'єктів на всій території держави; можливість виконання польотів на гранично малих висотах; можливість нанесення ударів у будь-яких погодних умовах незалежно від часу доби; можливість вибіркового ураження найважливіших елементів об'єктів; складність визначення часу та районів пуску крилатих (авіаційних) ракет повітряного базування (стартових позицій наземних комплексів).	Значні руйнування об'єкта або його найважливіших елементів; часткове або повне порушення функціонування об'єкта на тривалий час; висока імовірність загибелі та поранення людей, які перебувають на об'єкті; порушення транспортного сполучення внаслідок руйнування комунікацій та мостів; ймовірність підтоплення території внаслідок руйнування гребель, дамб, мостів; виникнення пожежі внаслідок пошкодження в системах енергозабезпечення та ушкодження резервуарів або трубопроводів; викиди небезпечних речовин внаслідок пошкодження резервуарів та трубопроводів; вибухи внаслідок детонації газових сумішей або легкозаймистих речовин та рідин.
2	Авіаційний удар	Велика маса осколково-фугасної БЧ керованих авіаційних ракет та бомб; низька точність некерованих авіаційних ракет та бомб; висока точність керованих авіаційних ракет та корегованих бомб; можливість застосування великої кількості авіаційних ракет та бомб по одному об'єкту; залежність можливостей ударів від погодних умов та часу доби; можливість одночасного застосування ракетного озброєння та авіаційних бомб з одного літака; можливість корегування авіаційного удару за результатами візуального оцінювання пілотом виконаного завдання.	Значні руйнування об'єкту або його найбільш важливих елементів; часткове або повне порушення функціонування об'єкту на тривалий час; висока імовірність загибелі та поранення людей, які знаходяться на об'єкті; порушення транспортного сполучення внаслідок руйнування комунікацій та мостів; ймовірність підтоплення території внаслідок руйнування гребель, дамб, мостів; виникнення пожежі внаслідок пошкодження в системах енергозабезпечення та ушкодження резервуарів або трубопроводів; викиди небезпечних речовин внаслідок пошкодження резервуарів і трубопроводів; вибухи внаслідок детонації газових сумішей або легкозаймистих речовин та рідин.
3	Удар використанням ударних БпЛА типу баражуючий	Середня маса осколково-фугасної БЧ ударного БпЛА; висока точність наведення ударного БпЛА на стаціонарний об'єкт;	Руйнування найбільш важливих елементів об'єкта; часткове або повне порушення функціонування об'єкту на тривалий час;

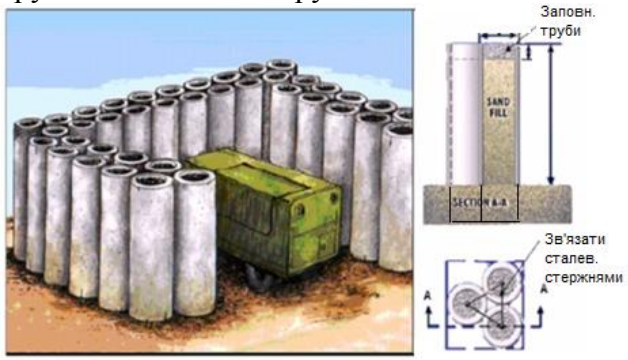
№ п/п	Вид загрози	Властивості загрози	Характеристики загрози
	боєприпас	низька швидкість польоту БпЛА; залежність можливостей завдання ударів від погодних умов; можливість масованого застосування по об'єктах по всій території держави; використання кумулятивних бойових частин на баражуючих боєприпасах.	висока імовірність загибелі та поранення людей, які перебувають на об'єкті; виникнення пожежі внаслідок пошкодження в системах енергозабезпечення та ушкодження резервуарів та трубопроводів; викиди небезпечних речовин внаслідок пошкодження резервуарів та трубопроводів; вибухи внаслідок детонації газових сумішей або легкозаймистих речовин та рідин.
4	Ракетно-артилерій-ські удари (обстріли)	Мала маса БЧ осколково-фугасної дії снарядів; середня маса БЧ осколково-фугасної дії ракет реактивних систем залпового вогню; низька точність стрільби некерованими ракетами та снарядами; велика швидкість польоту засобів ураження; можливість нанесення ударів у будь-яких погодних умовах незалежно від часу доби; можливість масованого застосування по об'єктах, розташованих у районах наближених до державного кордону або районах ведення бойових дій; можливість використання високоточних керованих боєприпасів (ракет) реактивними системами залпового вогню.	Значні руйнування об'єкта; часткове або повне порушення функціонування об'єкту на тривалий час; висока імовірність загибелі та поранення людей, які перебувають на об'єкті; виникнення пожежі внаслідок пошкодження в системах енергозабезпечення та ушкодження резервуарів та трубопроводів; викиди небезпечних речовин внаслідок пошкодження резервуарів і трубопроводів; вибухи внаслідок детонації газових сумішей або легкозаймистих речовин та рідин.

Додаток 3
Таблиця Д.3.1

Основні типи споруд першого рівня захисту

№	Варіант системи інженерного захисту, опис	Переваги	Недоліки, обмеження
1	Грунтомісткі системи із бігбегів, мішків із ґрунтом (пісок, пісок із щебневим відсівом) 	Висока швидкість улаштування Дешевизна Доступність	Необхідність подавати на монтаж, заповнений ґрунтом елемент Недовговічність Значна вразливість до дії погодних умов Обмежена висота
2	Грунтомісткі системи із фортифікаційних габіонів 	Середня швидкість улаштування Модульність Довговічність Гнучкість Покращена висота Рівномірність захисту Висока ремонтно-придатність	Складність улаштування, ризик обвалення у разі недотримання технології Необхідність підготовки основи
3	Металеві, або грунтомісткі системи із металевих контейнерів, вагонів 	Велика товщина захисту. Довговічна оболонка. Можливість повторного використання	Нерівномірність захисту, наявність просвітів. Суттєва вага оболонки

№	Варіант системи інженерного захисту, опис	Переваги	Недоліки, обмеження
4	Ґрунтомісткі – підпірні стінки із дерев’яних або металевих елементів із засипкою або/та обвалуванням ґрунтом.  	Висока швидкість улаштування Дешевизна. Доступність. Легкість ремонту	Необхідність значних площ на об'єкті. Мала ефективна висота Помірна довговічність
5	Бетонні, залізобетонні із блоків, дорожніх елементів, збірних плит і панелей 	Висока швидкість улаштування Відносна дешевизна Доступність. Можливість повторного використання	Наявність вторинних уламків. Нерівномірність захисту, наявність просвітів. Низька ремонтпридатність
6	Ґрунтомісткі - підпірні стінки із бетонних блоків із засипкою або/та обвалуванням ґрунтом 	Висока швидкість улаштування Відносна дешевизна Доступність	Необхідність значних площ на об'єкті Мала ефективна висота

№	Варіант системи інженерного захисту, опис	Переваги	Недоліки, обмеження
7	Ґрунтомісткі із ґрунтоцементу у знімній або незнімній опалубці 	Відносна дешевизна Доступність	Низька ремонтпридатність Подовжений час улаштування Наявність вторинних уламків
8	Ґрунтомісткі - підпірні стінки із залізобетонних труб із заповненням ґрунтом 	Відносна дешевизна Доступність Можливість повторного використання	Необхідність зв'язування труб між собою Обмежена висота Необхідність підготовки основи