МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЕКВІВАЛЕНТНОГО СТАТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ (ВІДПОВІДНО ДО ДБН В.2.2-5:2023) ЗА ЗНАЧЕННЯМИ ПОКАЗНИКІВ МАКСИМАЛЬНОГО НАДЛИШКОВОГО ТИСКУ ВИБУХУ (В КІЛОПАСКАЛЯХ) ДЛЯ ЗАГРОЗ ЖОВТОГО РІВНЯ НЕБЕЗПЕКИ

ЗМІСТ

Зміст ……	2
Перелік скорочень ……	3
Передмова …….	13
Вступ …….	16
РОЗДІЛ 1. Вихідні дані та визначення параметрів динамічного навантаження від повітряної ударної хвилі (ПУХ)	20
РОЗДІЛ 2. Динамічні характеристики матеріалів та параметри конструктивних елементів	21
РОЗДІЛ 3. Критерії граничних станів та пластичних деформацій елементів укриттів	24
РОЗДІЛ 4. Математичний апарат визначення коефіцієнта динамічності $K_{\text{дин}}$	25
РОЗДІЛ 5. Перевірка несучої здатності та армування перерізів за ДБН В.2.2-5:2023	26
РОЗДІЛ 6. Регламент та порядок багаторівневої валідації методики	27
РОЗДІЛ 7. Спрощена методика експертної оцінки захищеності наявних цивільних споруд (експертний модуль)	28
Висновки …….	32
Перелік джерел посилання ……	36
Додаток А	37
Додаток Б	46

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

1. СКОРОЧЕННЯ ТА АБРЕВІАТУРИ

- **БпАК** - безпілотний авіаційний комплекс
- **БпЛА** - безпілотний літальний апарат
- **БЧ** - бойова частина
- **ВР** - вибухова речовина
- **ГУЕ** - готові уражальні елементи
- **ДБЖ** - джерело безперебійного живлення
- **ДБН** - Державні будівельні норми України
- **ДЕС** - дизельна електрична станція
- **ДКР** - дослідно-конструкторська робота
- **ДСТУ** - Державний стандарт України
- **ЗГД** - захисно-герметичні двері
- **ЗПН** - засоби повітряного нападу
- **ІТЗ ЦЗ** - інженерно-технічні заходи цивільного захисту
- **КАБ** - керована авіаційна бомба
- **КОФЗБЧ** - кумулятивно-осколково-фугасна запалювальна бойова частина
- **КФЗБЧ** - кумулятивно-фугасна запалювальна бойова частина
- **МГН** - маломобільні групи населення
- **МЗС** - мала захисна секція (противибуховий пристрій)
- **ОФБЧ** - осколково-фугасна бойова частина
- **ОФЗБЧ** - осколково-фугасна запалювальна бойова частина
- **ОФС** - осколково-фугасний снаряд
- **ПКМУ** - Постанова Кабінету Міністрів України
- **ПРУ** - протирадіаційне укриття
- **ПУХ** - повітряна ударна хвиля
- **СПП** - споруда подвійного призначення

- **СТУ** - спеціальні технічні умови
- **ТББЧ** - термобарична бойова частина
- **ТБС** - термобарична суміш
- **ТЗ** - технічне завдання
- **ТК** - технічний комітет стандартизації
- **УЗС** - уніфікована захисна секція (противибуховий пристрій)
- **УМПК** - уніфікований модуль планування і корекції
- **ЦЗ** - цивільний захист
- **CEP** (*Circular Error Probable*) - кругове ймовірне відхилення (КЙВ)
- **CFD** (*Computational Fluid Dynamics*) - обчислювальна гідрогазодинаміка
- **DIC** (*Digital Image Correlation*) - цифрова кореляція зображень (метод оптичного вимірювання полів деформацій)
- **DIF** (*Dynamic Increase Factor*) - коефіцієнт динамічного зміцнення матеріалу
- **DLF** (*Dynamic Load Factor*) - коефіцієнт динамічності навантаження ($K_{\text{дин}}$)
- **FEA / FEM** (*Finite Element Analysis / Method*) - аналіз / метод скінченних елементів (МСЕ)
- **IATG** (*International Ammunition Technical Guidelines*) - міжнародні технічні керівні принципи щодо боєприпасів ООН
- **SDOF** (*Single Degree of Freedom*) - система з одним ступенем вільності (СДЗС)
- **SIF** (*Static Increase Factor*) - коефіцієнт статичного зміцнення (перевищення фактичної міцності сталі над нормативною)
- **UFC** (*Unified Facilities Criteria*) - уніфіковані критерії для об'єктів Міністерства оборони США
- **ULS** (*Ultimate Limit State*) - перший граничний стан (за несучою здатністю)

2. УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

2.1. Газодинамічні та просторово-часові параметри вибуху

- a_0 (c) - швидкість звуку в незбуреному повітрі за нормальних умов ($a_0 \approx 340{,}0$ м/с)
- C_D - аеродинамічний коефіцієнт лобового опору (для хвилі або уламка)

- C_E - коефіцієнт еквівалентного рівномірного навантаження для поверхонь обтікання
- C_r - газодинамічний коефіцієнт підсилення тиску при відбитті ($C_r = P_r / P_{so}$)
- $C_{r,\text{зв}}$ - швидкість звуку в області стисненого за фронтом відбитої хвилі повітря, м/с
- i_r ($I_{\text{відб}}$) - питомий імпульс позитивної фази відбитої ударної хвилі, кПа·мс (Па·с)
- i_s ($I_{\text{пад}}$) - питомий позитивний імпульс фази стиснення вільної падаючої хвилі, кПа·мс (Па·с)
- $K_{\text{підст}}$ - коефіцієнт підстильної поверхні (відбиття від основи: ґрунт $\approx 1{,}45$; сталева бронеплита $= 2{,}0$)
- $k_{\text{ТЕ}}$ ($K_{\text{ТНТ}}$) - коефіцієнт відносного тротилового еквівалента за типом вибухової речовини
- L_w - довжина позитивної хвилі стиснення ($L_w = U \cdot \tau$), м
- $m_{\text{вр}}$ (W) - фактична маса розривного заряду ВР бойової частини, кг
- $m_{\text{ТНТ}}$ - еквівалентна маса заряду в тротиловому еквіваленті ($m_{\text{ТНТ}} = W \cdot k_{\text{ТЕ}}$), кг
- P_0 (P_a) - нормальний абсолютний атмосферний тиск ($101{,}325$ кПа $= 101325$ Па)
- P_m - максимальний розрахунковий піковий динамічний тиск на поверхню конструкції, кПа (МПа)
- P_{qs} - квазістатичний надлишковий тиск продуктів детонації в замкненому або обмеженому об'ємі, кПа
- P_r ($\Delta P_{\text{відб}}$) - максимальний надлишковий тиск у фронті відбитої хвилі при нормальному ударі, кПа (МПа)
- $P_{r\alpha}$ - відбитий надлишковий тиск при косому падінні хвилі під кутом α, кПа
- P_{so} (ΔP_{Φ}, $\Delta P_{\text{пад}}$) - максимальний надлишковий тиск у фронті вільної падаючої ударної хвилі, кПа
- q_o - динамічний (швидкісний) напір повітряного потоку за фронтом ПУХ, кПа

- R (R_i) - геометрична відстань від центру детонації до розрахункової точки перешкоди, м
- R_0 - нормативний радіус приладового поля за ГОСТ В 25801–83 ($R_0 = 8 \cdot m^{1/3}$), м
- R^* - вирішальна мінімальна безпечна відстань за огинальною сукупності механізмів ураження, м
- t_c - час очищення тиску відбиття на обмеженому фасаді (clearing time), мс
- t_o (τ, t_+) - тривалість дії фази стиснення (позитивної фази тиску), мс (с)
- t_{rf} (t_d) - фіктивна тривалість дії еквівалентного трикутного імпульсу навантаження ($t_{rf} = 2i_r/P_r$), мс
- U (v_i) - швидкість поширення фронту повітряної ударної хвилі в середовищі, м/с
- W_c - маса металевого корпусу (оболонки) бойової частини, кг
- $W_{\text{еф}}$ - ефективна розрахункова маса заряду з урахуванням витрат енергії на руйнування оболонки (за Фішером), кг
- W_p - повна розрахункова маса заряду з урахуванням впливу підстильної поверхні, кг
- X_i - просторовий лінійний аргумент нормативу ГОСТ В 25801–83 ($X_i = m^{1/3}/R_i$), кг$^{1/3}$/м
- Z - масштабована зведена відстань Гопкінсона–Кренца ($Z = R/W^{1/3}$), м/кг$^{1/3}$
- α - кут падіння ударної хвилі відносно нормалі до поверхні перешкоди, град
- γ (k) - показник адіабати повітряного середовища ($\gamma = 1{,}4$ для нормальних умов)
- ξ - коефіцієнт бічного тиску ґрунту при вибухових навантаженнях

2.2. Конструктивні, жорсткісні та деформаційні параметри

- A_s - площа поперечного перерізу розтягнутої поздовжньої арматури на одиницю ширини смуги, мм^2/м (см^2/м)
- b - розрахункова ширина виділеної смуги перекриття чи стіни ($b = 1{,}0$ м)
- $B_{\text{екв}}$ - еквівалентна вигинна (циліндрична) динамічна жорсткість перерізу з урахуванням тріщиноутворення, Н·м^2 (кН·м^2)

- d - корисна робоча висота залізобетонного перерізу ($d = h - c - \emptyset/2$), мм (м)
- E_b (E_c) - статичний початковий модуль пружності бетону при стиску, МПа
- E_{bd} - розрахунковий динамічний модуль пружності бетону ($E_{bd} = 1{,}15 \cdot E_b$), МПа
- E_s - модуль пружності сталевої арматури ($E_s \approx 200$ ГПа)
- f_{ck} (f'_c, R_b) - нормативний / характеристичний опір осьовому стиску бетону, МПа
- f_{ds} (R_{yd}) - розрахунковий динамічний опір поздовжньої арматури на розтяг, МПа
- f'_{dc} (R_{bd}) - розрахунковий динамічний опір бетону на осьовий стиск при швидкісному деформуванні, МПа
- f_y (R_y) - нормативна статична межа текучості арматурної сталі, МПа
- h (T_c) - повна товщина плити перекриття або стіни, мм (м)
- $H_{\text{гр}}$ - товщина шару захисного ґрунтового насипу (обсипки) над конструкцією, м
- I_a - середній розрахунковий момент інерції залізобетонного перерізу для динамічного аналізу, м^4
- I_{cr} - момент інерції перерізу з тріщиною в розтягнутій зоні бетону, м^4
- I_g - геометричний момент інерції цілісного (нерозтрісканого) бетонного перерізу ($I_g = bh^3/12$), м^4
- $k_{\text{загл}}$ - коефіцієнт загасання тиску вибухової хвилі в товщі ґрунтової обсипки
- $K_{\text{дин}}$ (DLF) - коефіцієнт динамічності конструкції при дії імпульсного навантаження на згин
- $K_{\text{дин, зріз}}$ - коефіцієнт динамічності для перевірки несучої здатності на опорний прямий зріз
- K_E - узагальнена пружна згинальна жорсткість конструктивного елемента, кПа/м (Н/м)
- K_{LM} - коефіцієнт приведення маси і навантаження еквівалентного осцилятора (системи SDOF)

- L (H) - розрахунковий проліт конструктивного елемента (довжина плити або висота стіни в чистоті), м
- m - фактична маса погонного метра або одиниці площі конструкції ($m = \rho \cdot h$), кг/м^2
- M_{Ed} - розрахунковий максимальний динамічний згинальний момент від вибухового навантаження, кН·м
- $M_{\text{екв}}$ - приведена динамічна маса еквівалентного одномасового осцилятора ($M_{\text{екв}} = K_{LM} \cdot M$), кг
- $P_{\text{дов,екв}}$ - еквівалентне квазістатичне (довге ступінчасте) навантаження за критерієм рівності μ, кПа
- $P_{\text{екв}}$ - еквівалентне статичне навантаження на елемент для проєктування за ДБН В.2.2-5:2023, кПа
- $q_{\text{екв}}$ - еквівалентне погонне статичне навантаження на розрахункову смугу ($q_{\text{екв}} = P_{\text{екв}} \cdot b$), кН/м
- r_u (R_m) - граничний опір (гранична несуча здатність) конструктивного елемента при чистому згині, кПа
- T (T_N,T_n) - період власних пружних коливань конструктивного елемента за нижчою модою, с (мс)
- V_d - граничний опір перерізу бетону на прямий динамічний зріз біля опори (Direct Shear), кН/м
- $V_{\max}$ (V_{Ed}) - розрахункова динамічна поперечна реакція на опорі від вибухового навантаження, кН/м
- X_E ($y_{\text{ел}}$) - максимальний пружний прогин у середині прольоту на межі текучості робочої арматури, мм
- X_m ($y_{\max}$) - повний максимальний динамічний прогин у центрі прольоту, мм
- θ ($\theta_{\text{пл}}$) - кут пластичного повороту перерізу в опорному пластичному шарнірі, град (рад)
- θ_0 - безрозмірна відносна тривалість навантаження ($\theta_0 = \tau/T$)
- μ - коефіцієнт динамічної пластичності елемента ($\mu = X_m/X_E$)
- ρ (ρ_c) - густина залізобетону ($\rho \approx 2400...2500$ кг/м^3)
- ω - власна кругова частота коливань конструктивного елемента, рад/с

2.3. Параметри уламкової дії та локального пробиття

- e - гранична товщина залізобетонної перешкоди, що запобігає перфорації (наскрізному пробиттю) уламком, мм
- E_k - кінетична енергія уламка на дистанції зустрічі з перепоною або ціллю, Дж
- h_s - гранична товщина перешкоди, що гарантує відсутність тильного відколу бетону (spalling), мм
- k_v - коефіцієнт аеродинамічного гальмування уламка в повітряному середовищі, м$^{-1}$
- $m_{\text{ул}}$ - маса уражального уламка, г (кг)
- N^* - коефіцієнт форми головної частини уламка при проникненні в середовище за формулою NDRC
- v_0 - початкова швидкість розльоту уламків при руйнуванні оболонки БЧ за формулою Гурні, м/с
- $v(R)$ - швидкість уламка в момент зіткнення з перешкодою на відстані R, м/с
- x - глибина проникання уламка в масив матеріалу за модифікованою формулою NDRC, мм
- $\sqrt{2E'}$ - характеристична константа енергії Гурні для конкретного типу вибухової речовини, м/с

3. ТЕРМІНИ ТА ЇХНІ ВИЗНАЧЕННЯ

- **Безпечна відстань за огинальною (R^*)** - найбільша серед мінімальних безпечних дистанцій, розрахованих автономно за кожним із чотирьох механізмів ураження (фугасний згин, первинні уламки корпусу БЧ, локальне сколювання бетону, вторинні уламки засклення), яка гарантує незаходження за визначений граничний стан споруди.
- **Ближня зона вибуху** - просторова область ($Z < 1{,}0...1{,}5$ м/кг$^{1/3}$), у якій динамічне навантаження носить виражений високоінтенсивний бризантний характер, а руйнування конструкцій визначається локальними явищами (пробиття, відкол, прямий зсув) раніше розвитку загальної згинальної реакції.
- **Відбитий надлишковий тиск (P_r)** - тиск, що виникає при миттєвому гальмуванні падаючої ударної хвилі та потоку повітря за нею об нерухому плоску перешкоду; чисельно перевищує тиск у фронті падаючої хвилі в 2...8 разів (для ідеального газу) і до 9...10 разів (при термодинамічній дисоціації в надближній зоні).

- **Динамічний коефіцієнт зміцнення (**DIF**)** - безрозмірний множник, що визначає відносне зростання характеристик міцності матеріалу (межі текучості арматури або міцності бетону на стиск) в умовах високих швидкостей деформування ($\dot{\varepsilon} \sim 10^{-1}...10^{1}$ с$^{-1}$) порівняно зі статичними випробуваннями.
- **Динамічний режим навантаження** - режим навантаження залізобетонного елемента ($0{,}3 \leq \tau/T \leq 2{,}0$), за якого тривалість фази стиснення сумірна з власним періодом коливань, а максимальний прогин визначається як піковим тиском, так і величиною питомого імпульсу.
- **Еквівалентне статичне навантаження (**$P_{\text{екв}}$**)** - умовне фіктивне рівномірно розподілене статичне навантаження, прикладення якого викликає в елементі максимальні внутрішні напруження та згинальні моменти, тотожні піковій реакції за пружно-пластичної динамічної дії вибухової хвилі.
- **Еквівалентне довге навантаження (**$P_{\text{дов,екв}}$**)** - теоретичне ступінчасте (квазістатичне) навантаження необмеженої тривалості, яке викликає такий самий коефіцієнт динамічної пластичності μ, як і фактичний короткий імпульс вибуху бойової частини.
- **Імпульсний режим навантаження** - динамічний режим ($\tau/T < 0{,}3$), за якого позитивна фаза тиску ударної хвилі повністю закінчується до моменту досягнення конструкцією максимального прогину; граничні деформації цілком лімітуються переданою кінетичною енергією та питомим імпульсом.
- **Квазістатичний надлишковий тиск (**P_{qs}**)** - залишковий термодинамічний тиск нагрітих газоподібних продуктів детонації, який накопичується в замкненому чи частково замкненому об'ємі приміщення після згасання швидких відбитих ударних хвиль і діє ізотропно на огороджувальні конструкції протягом тривалого часу (сотні мілісекунд - секунди).
- **Квазістатичний режим деформування** - режим навантаження ($\tau/T > 2{,}0$), коли імпульс тиску діє суттєво довше за період коливань системи, внаслідок чого конструкція встигає повністю повторити профіль навантаження без інерційного запізнення.
- **Коефіцієнт динамічної пластичності (**μ**)** - відношення максимального повного прогину елемента в центрі прольоту X_m до пружного прогину X_E на умовній межі текучості арматури в пластичному шарнірі.

- **Коефіцієнт динамічності ($K_{\text{дин}}$)** - безрозмірний коефіцієнт переходу від пікового динамічного тиску P_m до розрахункового статичного еквівалента $P_{\text{екв}}$, що враховує інерційність маси, жорсткість та енергопоглинання конструкції в пластичній стадії.
- **Кут повороту опорного перерізу (θ)** - кут нахилу дотичної деформованої осі балки або плити в зоні опорного закріплення під дією динамічного прогину; слугує фундаментальним інженерним критерієм оцінки рівня пошкодження та збереження стійкості залізобетону.
- **Масштабована зведена відстань Гопкінсона–Кренца (Z)** - фундаментальний критерій газодинамічної та енергетичної подібності вибухів, що чисельно дорівнює відношенню фізичної відстані до кубічного кореня з тротилового еквівалента маси розривного заряду ($Z = R/W^{1/3}$).
- **Падаючий надлишковий тиск (ΔP_{Φ} / P_{so})** - надлишковий статичний тиск повітря у фронті вільної ударної хвилі, що поширюється в середовищі без перешкод або вимірюється на поверхнях, орієнтованих паралельно до вектора руху фронту (дифракційне ковзання).
- **Пластичний шарнір** - локалізована ділянка залізобетонного елемента (у середині прольоту або безпосередньо біля жорстких опор), у якій напруження в розтягнутій арматурі досягають динамічної межі текучості, спричиняючи поворот перерізів при умовно постійному внутрішньому граничному згинальному моменті M_u.
- **Прямий динамічний зріз (*Direct Shear*)** - миттєве крихке зрізання поперечного перерізу залізобетонного елемента біля опорної межі під дією пікових величин поперечної сили у початкові частки мілісекунди, що відбувається за чистою вертикальною тріщиною без розвитку згинальних деформацій.
- **Система з одним ступенем вільності (SDOF)** - ідеалізована розрахункова схема конструктивного елемента, просторовий деформований стан якого зведено до руху однієї точки (еквівалентна маса $M_{\text{екв}}$, узагальнена пружно-пластична опірна функція $R(x)$ та приведене навантаження $F(t)$).
- **Тильний відкол бетону (*Spall*)** - відрив та високошвидкісний розліт фрагментів захисного шару бетону з ненавантаженої (внутрішньої) поверхні плити або стіни під дією інтерференції та відбиття пружної хвилі розтягу, викликаної короткою ударною хвилею високої амплітуди.
- **Час очищення тиску відбиття (t_c)** - часовий проміжок, протягом якого початковий високий тиск відбиття P_r на лицьовій грані стіни обмежених

розмірів стрімко падає до суми тиску обтікання та швидкісного напору внаслідок приходу хвиль розвантаження від відкритих кутів і країв фасаду.

ПЕРЕДМОВА

Цей нормативно-методичний документ присвячено фізико-математичному обґрунтуванню та практичній інженерній реалізації єдиного алгоритму визначення коефіцієнта динамічності ($K_{\text{дин}}$), еквівалентного статичного навантаження ($P_{\text{екв}}$) і граничних деформацій залізобетонних згинальних конструкцій (плит покриття, перекриття, зовнішніх і внутрішніх стін) захисних споруд цивільного захисту та наявних будівель відповідно до вимог Розділу 14 ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту» й критеріїв реагування за постановою Кабінету Міністрів України від 04.09.2026 № 1092 «Деякі питання оптимізації захисту населення та реагування на загрози засобів повітряного нападу».

Масоване застосування засобів повітряного нападу (ЗПН), зокрема ударних безпілотних авіаційних комплексів (БпАК) типу «Герань» із широкою номенклатурою бойових частин (ОФЗБЧ, КФЗБЧ, КОФЗБЧ, БСФМСНИ) із масою розривного заряду від 16,5 до 45,0 кг та еквівалентом до 56,25 кг ТНТ, виявило суттєвий методологічний розрив між класичними цивільними будівельними нормами та реальними параметрами високоінтенсивного імпульсного навантаження. Застосування нормативних вимог ДБН В.2.2-5:2023, які орієнтовані на дію сформованої хвилі значної тривалості ($\tau \geq 100...500$ мс), до короткочасних гострих імпульсів детонації бойових частин ($\tau = 1...15$ мс) без урахування часового чинника та пружно-пластичної роботи матеріалів призводить до штучного завищення розрахункових товщин і перевитрати арматури або до помилкових висновків про руйнування капітальних споруд.

Методологічну основу розробленої методики побудовано на узгодженні двох взаємопов’язаних розрахункових контурів:

1. **Нормативного інженерного контуру (ДБН В.2.2-5:2023 / ДСТУ 3008:2015):** регламентує обов’язкові процедури проєктування та експертизи захисних споруд за першою групою граничних станів (ULS),

вимоги щодо збереження герметичності (класи сховищ А-I – А-IV) та загальної стійкості укриттів (групи ПРУ П-1 – П-4, СПП).

2. **Фізично верифікованого військово-інженерного контуру (UFC 3-340-02 / PDC-TR 06-08 / Kingery-Bulmash / UN SaferGuard):** забезпечує розрахунок нелінійного відгуку еквівалентних динамічних систем з одним ступенем вільності (SDOF), враховує коефіцієнти динамічного зміцнення матеріалів (DIF), критерії кутів повороту в пластичних шарнірах (θ), а також встановлює фізичні параметри повітряної ударної хвилі (ПУХ) над деформівним ґрунтом ($K_{\text{підст}} \approx 1{,}45$) з урахуванням ефектів термодинамічної дисоціації в надближній зоні ($Z < 0{,}5$ м/кг$^{1/3}$).

У методиці вперше системно реалізовано:

- **Замкнений тригілковий алгоритм визначення $K_{\text{дин}}$:** прямий аналітичний перехід від параметрів вибухової хвилі через безрозмірний параметр τ/T і коефіцієнт пластичності μ до еквівалентного статичного навантаження $P_{\text{екв}}$ в імпульсному ($\tau/T < 0{,}3$), проміжному ($0{,}3 \leq \tau/T \leq 2{,}0$) та квазістатичному ($\tau/T > 2{,}0$) режимах.
- **Чітке розмежування форм руйнування:** відокремлення розрахунку загальної згинальної пластичної несучої здатності від перевірки на крихкий прямий динамічний зріз біля опор (*Direct Shear*), що виконується суто за пружною моделлю ($\mu = 1{,}0$) на повний піковий тиск.
- **Спеціальний експертний модуль (Розділ 7):** спрощену аналітичну процедуру перерахунку короткого імпульсу БЧ у фіктивне довге навантаження $P_{\text{дов,екв}}$ за критерієм рівності коефіцієнта пластичності μ, що забезпечує пряме зіставлення стійкості наявних цивільних будівель із нормативними класами укриттів ДБН.
- **Чотирирівневий регламент валідації:** програму метрологічного узгодження результатів шляхом крос-стандартизації (програмний комплекс SBEDS), числового гідродинамічного моделювання (LS-DYNA),

стендових полігонних випробувань із застосуванням датчиків Dytran, осцилографів PicoScope та оптичної DIC-системи Photron FASTCAM, а також процедур розгляду профільним ТК 304.

Методика призначена для використання інженерами-проєктувальниками, фахівцями науково-дослідних установ сил безпеки та оборони, експертами будівельної галузі та органами цивільного захисту під час розроблення проєктно-кошторисної документації, складання спеціальних технічних умов (СТУ), проведення обстежень пошкоджених будівель і встановлення рубежів безпеки населення в межах вимог постанови КМУ від 04.09.2026 № 1092.

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний досвід ліквідації наслідків застосування противником засобів повітряного нападу (ЗПН) по території України, а також аналіз уражень будівельного фонду цивільного захисту свідчать про критичну зміну структури динамічних загроз. Масоване застосування ударних безпілотних авіаційних комплексів (БпАК) оперативно-тактичного рівня (типу «Герань-2»/«Шахед-136») із широкою номенклатурою бойових частин (ОФЗБЧ, КФЗБЧ, КОФЗБЧ, БСФМСНИ, ТББЧ) формує принципово відмінні умови навантаження на огороджувальні конструкції будівель та укриттів. Маси розривних зарядів таких виробів становлять від 16,5 до 45,0 кг, а їхній тротиловий еквівалент з урахуванням високоенергетичних сумішей (ОЛА-15Т, ТГФ-35П2, Окфол) сягає понад 56 кг ТНТ.

Водночас чинні в Україні норми проєктування укриттів - ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту» - орієнтовані переважно на квазістатичну дію повітряної ударної хвилі (ПУХ) великої тривалості ($\tau \geq 100...500$ мс), характерної для класичних ядерних або великокаліберних боєприпасів на значній відстані. Короткочасна дія бойових частин ЗПН характеризується гострим імпульсом ($\tau = 1...15$ мс), унаслідок чого конструкція працює у вираженому імпульсному або динамічному режимі. Пряме порівняння пікового тиску відбиття таких БЧ ($P_r > 300...1000$ кПа) із номінальними класами захисту ДБН (А-IV = 100 кПа, А-III = 200 кПа тощо) без урахування часового чинника, динамічної інерційності споруди та пружно-пластичної роботи матеріалів призводить до хибних висновків про руйнування капітальних укриттів або до штучного завищення матеріаломісткості при новому будівництві.

Прийняття постанови Кабінету Міністрів України від 04.09.2026 № 1092 нормативно закріпило рівні небезпеки та запровадило порогові критерії «жовтого рівня загроз». Виникла нагальна потреба в усуненні методичного розриву між газодинамічним розрахунком боєприпасів ЗПН, військово-інженерним апаратом динаміки споруд (UFC 3-340-02) та нормативним

контуром будівельного проєктування (ДБН В.2.2-5:2023), що й зумовлює високу актуальність теми цієї методики.

Зв’язок роботи з науковими та практичними завданнями. Роботу виконано в межах прикладних науково-дослідних робіт із науково-технічного супроводження інженерно-технічних заходів цивільного захисту, безпеки критичної інфраструктури та оперативного планування відповідно до:

- Кодексу цивільного захисту України (№ 5403-VI);
- Законів України «Про національну безпеку України» (№ 2469-VIII), «Про правовий режим воєнного стану» (№ 389-VIII) та «Про регулювання містобудівної діяльності» (в частині вимог Закону № 2486-IX щодо захисних споруд);
- Постанови Кабінету Міністрів України від 04.09.2026 № 1092;
- Вимог нормативних документів ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту» та ДСТУ 3008:2015 щодо оформлення звітів у сфері науки і техніки;
- Стандарту Міністерства оборони США UFC 3-340-02 «Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions».

Дослідження спрямоване на розв'язання науково-прикладного завдання - створення верифікованої інженерної методики визначення коефіцієнта динамічності ($K_{\text{дин}}$), еквівалентного статичного навантаження ($P_{\text{екв}}$) та оцінки захищеності огороджувальних залізобетонних конструкцій споруд цивільного захисту та наявних цивільних будівель від дії короткоімпульсного вибухового навантаження штатних БЧ засобів повітряного нападу.

Об’єкт дослідження. Об’єктом дослідження є процес пружно-пластичного динамічного деформування, перерозподілу внутрішніх зусиль і виникнення граничних станів у згинальних залізобетонних конструкціях (плитах перекриття, покриття, огороджувальних стінах) під час взаємодії з короткоімпульсною повітряною ударною хвилею наземного підриву бойових частин засобів повітряного нападу.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є аналітичні залежності коефіцієнта динамічності ($K_{\text{дин}}$), еквівалентного статичного навантаження ($P_{\text{екв}}$), граничного коефіцієнта динамічної пластичності (μ), кутів повороту в пластичних шарнірах (θ) та еквівалентного довгого навантаження ($P_{\text{дов,екв}}$) відповідно до положень Розділу 14 ДБН В.2.2-5:2023 та апарату SDOF стандарту UFC 3-340-02.

Мета дослідження. Метою дослідження є розроблення, фізико-математичне обґрунтування та встановлення порядку валідації уніфікованої інженерної методики динамічного розрахунку згинальних залізобетонних елементів укриттів, яка забезпечує перехід від високоінтенсивного імпульсу тиску БЧ до еквівалентного статичного навантаження за ДБН В.2.2-5:2023, а також створення спрощеного експертного модуля для категоризації та оцінки захищеності наявних цивільних споруд.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети використано такі наукові методи:

1. *Метод еквівалентних систем з одним ступенем вільності (SDOF, теорія Біггса)* - для зведення реальних просторових конструктивних елементів (плит і стін) до динамічних одномасових осциляторів із пружно-пластичною функцією опору.
2. *Метод енергетичного балансу та граничної пластичності (UFC 3-340-02 / PDC-TR 06-08)* - для аналітичного виведення коефіцієнта динамічності $K_{\text{дин}}$ у трьох фізичних режимах навантаження (імпульсному, проміжному, квазістатичному) та визначення критеріїв кута розкриття тріщин θ.
3. *Метод газодинамічного аналізу вільного поля та відбиття (Kingery-Bulmash / UN SaferGuard)* - для визначення достовірних амплітудно-часових параметрів хвилі (ΔP_{Φ}, P_r, i_s, i_r, τ) над деформівним ґрунтом з урахуванням маси оболонки (формула Фішера).
4. *Метод пружно-пластичної еквівалентності (за рівністю деформацій μ)* - для побудови спрощеного експертного алгоритму перерахунку короткого імпульсу в еквівалентне довге навантаження норм цивільного захисту.

5. *Метод числового нелінійного динамічного моделювання (Explicit FEA / LS-DYNA)* та *метод теорії геометричного масштабування вибухів (Гопкінсона–Кренца)* - для забезпечення багаторівневої метрологічної валідації аналітичного апарату методики.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення результатів розроблення методики полягає у:

1. *Створенні нормативно узгодженого алгоритму проєктування за ДБН В.2.2-5:2023:* розроблено аналітичний інструмент прямого перерахунку параметрів ударної хвилі конкретної БЧ у розрахунковий згинальний момент M_{Ed} та необхідну площу арматури A_s, що усуває штучне завищення вартості будівництва укриттів.
2. *Чіткому розмежуванні механізмів згинального деформування та крихкого зрізу:* усунуто небезпечну інженерну помилку шляхом введення обов'язкової автономної перевірки на прямий динамічний зріз (*Direct Shear*) біля опор за суто пружною моделлю ($\mu = 1{,}0$) на повний піковий тиск відбиття.
3. *Формуванні спрощеного інженерного інструменту експертизи (Розділ 7):* розроблено експертну методику та матриці перерахунку імпульсу БЧ (90 кг тощо) у ступінчастий тиск ДБН, що дає змогу швидко оцінювати реальну міцність конструкцій житлових і громадських будівель без проведення складного скінченноелементного моделювання.
4. *Метрологічній регламентації валідації:* сформовано чотирирівневу систему верифікації методики (порівняння з комплексом SBEDS армії США, гідрокодами LS-DYNA та схемою стендових полігонних випробувань із цифровими п'єзодатчиками Dytran 2300V5 і високошвидкісними камерами Photron FASTCAM), що забезпечує наукову достовірність результатів для їхньої подальшої сертифікації та затвердження профільним технічним комітетом ТК 304.

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЕКВІВАЛЕНТНОГО СТАТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ (ВІДПОВІДНО ДО ДБН В.2.2-5:2023) ЗА ЗНАЧЕННЯМИ ПОКАЗНИКІВ МАКСИМАЛЬНОГО НАДЛИШКОВОГО ТИСКУ ВИБУХУ (В КІЛОПАСКАЛЯХ) ДЛЯ ЗАГРОЗ ЖОВТОГО РІВНЯ НЕБЕЗПЕКИ

Ця методика встановлює єдиний порядок розрахунку коефіцієнта динамічності $K_{\text{дин}}$, еквівалентного статичного навантаження $P_{\text{екв}}$, граничних пластичних деформацій та несучої здатності залізобетонних згинальних елементів (плит покриття, перекриття, зовнішніх і внутрішніх стін) за першою групою граничних станів (ULS). Вона гармонізує положення **Розділу 14 ДБН В.2.2-5:2023**, апарат динаміки споруд стандарту Міністерства оборони США **UFC 3-340-02**, критерії пошкоджень **PDC-TR 06-08/ASCE 59-11** та верифіковану базу газодинамічних параметрів вибуху **Kingery-Bulmash / UN SaferGuard**.

Методика містить два взаємодоповнюючі контури:

1. **Основний контур (Проєктувально-перевірочний):** прямий розрахунок еквівалентного навантаження $P_{\text{екв}}$ та підбір армування/перевірка перерізів елементів захисних споруд (сховищ, ПРУ, СПП) за нормами ДБН В.2.2-5:2023.
2. **Спеціальний контур (Розділ 7 -Спрощена методика експертної оцінки):** швидка категоризація та оцінка уразливості наявних цивільних будівель під дією конкретних бойових частин (БЧ) засобів повітряного нападу шляхом перерахунку короткого імпульсу в еквівалентний довгий нормативний тиск ДБН.

1. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ГАЗОДИНАМІЧНИЙ ВХІДНИЙ КОНТУР

1.1. Розрахункова загроза та ефективна маса заряду

Для приведення реального боєприпасу до розрахункового заряду у вільному полі враховують тротиловий еквівалент $k_{\text{ТЕ}}$ ($K_{\text{ТНТ}}$), втрати енергії на дроблення/розгін корпусу за формулою Фішера (Fisher) та вплив підстильної поверхні:

$$W_{\text{еф}} = k_{\text{ТЕ}} \cdot W \cdot \left(0{,}2 + \frac{0{,}8}{1 + W_c/W}\right) \quad [\text{кг}] \quad (1).$$

де W -фактична маса ВР у бойовій частині; W_c -маса металевого корпусу/оболонки; $k_{\text{ТЕ}}$ -коефіцієнт відносної фугасності ($k_{\text{ТЕ}} = 1{,}25$ для ТГФ-35П2; 1,45 для ОЛА-15Т).

Для наземного підриву на деформівному ґрунті ($K_{\text{підст}} \approx 1{,}45$) розрахункова маса становить $W_p \approx 1{,}8 \cdot W_{\text{еф}}$. Для підриву на масивній сталевій бронеплиті полігону ($K_{\text{підст}} = 2{,}0$) параметри приймаються за контуром ГОСТ В 25801–83.

1.2. Визначення просторово-часових параметрів хвилі

За масштабованою відстанню Гопкінсона–Кренца $Z = R/W_p^{1/3}$ ($Z = R/m^{1/3}$) із поліномів Kingery-Bulmash / UN SaferGuard або апроксимацій Кінні–Грехема визначають:

- $\Delta P_{\text{Ф}}$ (P_{so}) -максимальний надлишковий тиск у фронті вільної падаючої хвилі;
- P_r ($\Delta P_{\text{відб}}$) -тиск нормального відбиття;
- i_s ($I_{\text{пад}}$), i_r ($I_{\text{відб}}$) -питомі позитивні імпульси падаючої та відбитої хвиль;
- τ (t_o) -тривалість дії позитивної фази тиску.

2. РОЗРАХУНКОВІ СХЕМИ ТА ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕМЕНТІВ

Конструкція розглядається як розрахункова смуга завширшки $b = 1{,}0$ м, товщиною h (T_c) і прольотом L. Вона приводиться до еквівалентного одномасового осцилятора (SDOF).

Імпульс повітряної хвилі: P(t) = Pm · (1 - t/τ).

Приведена маса: Мекв = KLM M.

Жорсткість: K = 384·Векв / (5·L³).

Власний період коливань: T = 2π · √(Мекв/K).

Співвідношення тривалостей: θ0 = τ/T:

Імпульсний режим: θ0 < 0.3;

Динамічний режим: 0.3 ≤ θ0 ≤ 2.0;

Квазістатичний режим: θ0 > 2.0.

2.1. Пікове навантаження на поверхню (P_m)

1. **Горизонтальні перекриття (дифракційне ковзне обтікання):** $P_m = \Delta P_{\Ф}$.
2. **Горизонтальні перекриття під шаром ґрунту завтовшки $H_{\text{гр}}$:** $P_m = k_{\text{загл}} \cdot \Delta P_{\Ф}$, де $k_{\text{загл}} = \exp\left(-0{,}05 \cdot H_{\text{гр}}\right)$.
3. **Вертикальні відкриті стіни (лобовий нормальний удар):** $P_m = P_r = 2\Delta P_{\Ф} \cdot \left(\frac{7P_0 + 4\Delta P_{\Ф}}{7P_0 + \Delta P_{\Ф}}\right)$ (при $Z \geq 0{,}5$ м/кг$^{1/3}$).
4. **Вертикальні стіни у ґрунтовому масиві:** $P_m = \xi \cdot \Delta P_{\Ф}$, де $\xi = 0{,}30...0{,}50$.

2.2. Динамічне зміцнення матеріалів (DIF / SIF)

Згідно з UFC 3-340-02 (Chapter 4) та ДБН В.2.2-5:2023 (п. 14.3):

- **Бетон на стиск:** $f'_{dc} = R_{bd} = \text{DIF}_c \cdot R_b$ ($\text{DIF}_c = 1{,}19...1{,}25$ для згину; $1{,}10...1{,}12$ для зрізу).
- **Арматура (A500C / Gr 60):** $f_{ds} = R_{yd} = \text{DIF}_s \cdot \text{SIF} \cdot f_y$ ($\text{DIF}_s = 1{,}17$; SIF $\approx 1{,}10 \Longrightarrow f_{ds} \approx 1{,}28 \cdot f_y$).
- **Модуль пружності бетону:** $E_{bd} = 1{,}15 \cdot E_b$ (за ACI/ДБН: $E_b \approx 4700\sqrt{f'_c}$ МПа).

2.3. Власні динамічні параметри конструкції

1. **Згинальна еквівалентна жорсткість перерізу (з урахуванням тріщиноутворення):**

$$I_g = \frac{bh^3}{12}, \quad I_{cr} = \frac{b(kd)^3}{3} + nA_s(d - kd)^2, \quad I_a = \frac{I_g + I_{cr}}{2} \approx 0{,}50 \cdot I_g \ (2).$$

$$B_{\text{екв}} = E_{bd} \cdot I_a \quad (3).$$

2. **Пружна жорсткість елемента (K):**
   - Шарнірне обпирання: $K = \frac{384 B_{\text{екв}}}{5L^3}$;
   - Жорстке защемлення: $K = \frac{384 B_{\text{екв}}}{L^3}$.
3. **Еквівалентна маса ($M_{\text{екв}}$):**

$$M = \rho \cdot h \cdot b \cdot L \quad [\text{кг}], \qquad M_{\text{екв}} = K_{LM} \cdot M \qquad [\text{cite: 1}]$$

де K_{LM} -коефіцієнт приведення маси за UFC 3-340-02 / Biggs ($K_{LM} \approx 0{,}78$ у пружній фазі; 0,66 у пластичній; середнє розрахункове значення $k_m \approx 0{,}72$ або 0,40 від повної маси балки).

4. **Період власних пружних коливань:**

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{M_{\text{екв}}}} \quad [\text{рад/с}], \qquad T = \frac{2\pi}{\omega} \quad [\text{с}] \quad (4).$$

3. КРИТЕРІЇ ГРАНИЧНИХ СТАНІВ ТА ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ

Для оцінки граничного стану використовуються кут повороту опорного перерізу $\theta \approx \arctan(2X_m/L) \approx 2X_m/L$ та коефіцієнт пластичності $\mu = X_m/X_E$:

Категорія захисту/Рівень пошкодження за PDC-TR 06-08 та ДБН	**Допустимий стан конструкції**	**Граничний коефіцієнт $\mu = X_m/X_E$**	**Граничний кут повороту θ**
Поверховий/B-1 (Легкі)	Пружні деформації, збереження повної герметичності.	$\mu \leq 1{,}0 \ldots 1{,}5$	$\theta \leq 1{,}0^\circ$
Помірний/B-2 (Середні)	Залишкові деформації, укриття придатне до експлуатації, люди захищені (сховища A-I – A-IV).	$\mu \leq 3{,}0$	$\theta \leq 2{,}0^\circ$ (без поперечних хомутів)
Важкий/B-3 (Значні)	Елемент не ремонтопридатний, але без обвалення (ПРУ груп П-1 – П-4, СПП).	$\mu \leq 5{,}0 \ldots 6{,}0$	$\theta \leq 4{,}0^\circ \ldots 6{,}0^\circ$ (обов'язкові хомути 135°)
Критичний/B-4 (Зріз)	Прямий динамічний зріз біля опор бетону (крихке руйнування).	$\mu = 1{,}0$ (суто пружний розрахунок)	$\theta = 0^\circ$

4. АЛГОРИТМ ОБЧИСЛЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ДИНАМІЧНОСТІ $K_{\text{дин}}$

Залежно від безрозмірної тривалості $\theta_0 = \tau/T$ розрахунок ведеться за трьома замкненими аналітичними гілками:

Гілка А. Імпульсний режим ($\boldsymbol{\theta_0 = \frac{\tau}{T} < 0{,}3}$)

Дія тиску закінчується раніше, ніж конструкція досягає максимального прогину. Розрахунок базується на переданому питомому імпульсі $i = \frac{1}{2}P_m\tau$:

$$K_{\text{дин}} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{\tau}{T}\right)}{\sqrt{2\mu - 1}} \quad (5).$$

Гілка Б. Квазістатичний режим ($\boldsymbol{\theta_0 = \frac{\tau}{T} > 2{,}0}$)

Тиск діє тривалий час, відгук конструкції визначається квазістатичним балансом сил:

$$K_{\text{дин}} = \frac{1}{1 - \frac{1}{2\mu}} = \frac{2\mu}{2\mu - 1} \quad (6).$$

(При $\mu = 1{,}0 \Longrightarrow K_{\text{дин}} = 2{,}0$*; при* $\mu = 3{,}0 \Longrightarrow K_{\text{дин}} = 1{,}20$*; при* $\mu \geq 5{,}0 \Longrightarrow K_{\text{дин}} \to 1{,}1 \ldots 1{,}0$*).*

Гілка В. Динамічний проміжний режим ($\boldsymbol{0{,}3 \leq \theta_0 \leq 2{,}0}$)

Застосовується замкнена апроксимація динамічного відгуку UFC 3-340-02 для спадаючого трикутного імпульсу:

$$K_{\text{дин}} = \frac{1}{\sqrt{2\mu - 1}} \cdot \left[1 - \frac{1}{2\mu \cdot \left(\frac{\tau}{T}\right)}\right] + \frac{1}{2\mu} \quad (7).$$

(Якщо для пластичних стадій $\mu \geq 2$ *розрахункове значення перевищує* $1{,}5$*, його обмежують:* $K_{\text{дин}} \leq 1{,}5$*).*

5. ПРОЄКТУВАЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК ЗА ДБН В.2.2-5:2023

1. **Еквівалентне статичне навантаження:**

$$P_{\text{екв}} = K_{\text{дин}} \cdot P_m \quad [\text{кПа}], \qquad q_{\text{екв}} = P_{\text{екв}} \cdot b \quad [\text{кН/м}]$$

2. **Розрахунковий динамічний опір та згинальний момент:**

$$M_{Ed} = \frac{q_{\text{екв}} \cdot L^2}{\alpha} \quad (8).$$

(де $\alpha = 8$ для шарнірних опор; $\alpha = 16$ для затиснених опор із урахуванням перерозподілу моментів у пластичних шарнірах).

Необхідна площа робочої поздовжньої арматури:

$$A_s \geq \frac{M_{Ed}}{0{,}9 \cdot d \cdot f_{ds}} \quad (9).$$

3. **Перевірка на прямий динамічний зріз біля опор (Direct Shear):** *Критерій:* руйнування бетону на зріз є крихким, тому приймається $\mu = 1{,}0$.

$K_{\text{дин, зріз}} = \min\left(\pi \cdot \frac{\tau}{T}; 2{,}0\right)$ (10).

Опорна реакція за Біггсом (Biggs):

$$V_{\max} = 0{,}38 \cdot r_u L + 0{,}12 \cdot P_m L \quad (11).$$

Умова міцності на прямий зсув за UFC 3-340-02 (без косих стрижнів):

$$V_{\max} \leq V_d = 0{,}18 \cdot f'_{dc} \cdot b \cdot d \quad (12).$$

Приклад розрахунку $K_{\text{дин}}$ ТА $P_{\text{екв}}$ для максимальних режимів навантаження наведений в Додатку А, Б.

6. ПОРЯДОК ВАЛІДАЦІЇ МЕТОДИКИ

Валідація методики проводиться за 4-рівневим регламентом метрологічного узгодження:

[Рівень I: Benchmark] Звірка з кодом SBEDS, (похибка ≤ 8%);

[Рівень II: Hydrocode] LS-DYNA (MAT_072R3), Abaqus (похибка ≤ 15%);

[Рівень III: Стенд] Масштабні підриви, Dytran/Photron/Pico;

[Рівень IV:] Експертний звіт, для сертифікації.

1. **Рівень I (Крос-нормативний бенчмаркінг):**
   - Порівняння результатів обчислення $K_{\text{дин}}$, $P_{\text{екв}}$ та максимального прогину X_m із розрахунками у верифікованому комплексі Інженерного корпусу армії США **SBEDS** (версії 4.1+) для матриці з 30 комбінацій ($h = 200...600$ мм, $L = 3...6$ м, $\Delta P_{\Phi} = 50...500$ кПа).
   - *Критерій успішності:* розбіжність значень $\leq \pm$ 8%.
2. **Рівень II (Числове моделювання у гідрокодах):**
   - 3D нелінійний динамічний розрахунок в **LS-DYNA** (Explicit solver) із застосуванням моделей бетону *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 (MAT_072R3) та арматури *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (MAT_024) з урахуванням швидкості деформації Каупера-Саймондса.
   - *Критерій успішності:* розбіжність за піковим прогином у центрі прольоту $\leq \pm$ 15%.
3. **Рівень III (Стендовий полігонний експеримент):**
   - Випробування серії модельних балок/плит масштабу 1:2 або 1:4 за законом Гопкінсона-Кренца ($R/W^{1/3} = \text{const}$).
   - Вимірювальний тракт: високочастотні датчики надлишкового та відбитого тиску **Dytran 2300V5** (підключені через USB-осцилографи **PicoScope 4000/5000** з дискретизацією $\geq$ 20 Мвиб/с) синхронно з оптичною високошвидкісною реєстрацією деформацій камерами **Photron FASTCAM** (10 000–20 000 fps) методом цифрової кореляції зображень (DIC).
   - *Критерій успішності:* відсутність ненавмисного прогресуючого руйнування та підтвердження кута повороту в шарнірі $\theta_{\text{експ}} \leq \theta_{\text{доп}}$.

4. **Рівень IV (Нормативна апробація):**
    - Оформлення науково-технічного звіту та узгодження з профільним технічним комітетом стандартизації (ТК 304 «Захисні споруди цивільного захисту»).

7. СПРОЩЕНА МЕТОДИКА ЕКСПЕРТНОЇ ОЦІНКИ ЗАХИЩЕНОСТІ ЦИВІЛЬНИХ СПОРУД

Цей розділ є самостійним експертним модулем, призначеним для швидкої оцінки стійкості будівель, обстеження укриттів та визначення безпечних приміщень за принципом: «Якому нормативному довгому тиску ДБН еквівалентна дія конкретної БЧ на заданій відстані?»

7.1. Фізична сутність та формула перерахунку

Нормативні навантаження ДБН В.2.2-5:2023 формуються хвилями великої тривалості ($\tau \geq 100...500$ мс), що є квазістатичними для будівельних конструкцій ($T = 10...50$ мс). Імпульс від бойових частин ЗПН масою 20–90 кг триває лише $\tau = 1...15$ мс.

Еквівалентним довгим навантаженням $P_{\text{дов,екв}}$ вважається таке постійне (ступінчасте) навантаження, яке викликає такий самий коефіцієнт пластичності $\mu = X_m/X_E$, як і реальний вибуховий імпульс.

1. **Для короткоімпульсного режиму ($t_d/T < 0{,}1$):** Прирівнюючи динамічний опір конструкції під дією імпульсу $R_m = \frac{i \cdot \omega}{\sqrt{2\mu - 1}}$ (де $\omega = 2\pi/T$) до опору при ступінчастому навантаженні $R_m = P_{\text{дов}} \frac{2\mu}{2\mu - 1}$, отримуємо аналітичну формулу прямого експертного перерахунку:

$$P_{\text{дов,екв}} = \frac{2\pi \cdot i_r}{T} \cdot \frac{\sqrt{2\mu - 1}}{2\mu} \quad (13).$$

де i_r -питомий імпульс відбитої хвилі на фасаді; T -власний період коливань стіни/панелі; μ -розрахунковий рівень пластичності.

2. **Зв'язок із фактичною міцністю елемента (r_u):** Якщо елемент уже зведений і відома його гранична несуча здатність r_u, еквівалентне довге навантаження за відомим фактичним прогином μ становить:

$$P_{\text{дов,екв}} = r_u \cdot \frac{2\mu - 1}{2\mu} \quad (14)$$

(Для пружного стану $\mu \leq 1$: $P_{\text{дов,екв}} = r_u \cdot \frac{\mu}{2}$).

7.2. Експертна таблиця еквівалентного довгого тиску ДБН

Нижче наведено зведені результати експертного перерахунку для типової фугасно-уламкової БЧ ($W = 50$ кг, $W_c = 40$ кг, $k_{\text{ТЕ}} = 1{,}3 \Longrightarrow W_p \approx 75$ кг ТНТ

над ґрунтом) для залізобетонних стінових панелей із типовими періодами $T = 10{,}20{,}30$ мс при нормальному відбитті хвилі:

Відстань R, м	Z, $Z < 1{,}0$ м/кг$^{1/3}$	P_{so}, кПа	P_r, кПа	i_r, кПа·мс	t_d, мс	$P_{\text{дов,екв}}$ ($T = 10$ мс), кПа $\mu = 1/\mu = 3$	$P_{\text{дов,екв}}$ ($T = 20$ мс), кПа $\mu = 1/\mu = 3$	$P_{\text{дов,екв}}$ ($T = 30$ мс), кПа $\mu = 1/\mu = 3$
1*	0,24	12920	99300	5650	0,1	1776/1324	888/662	592/441
3*	0,71	2058	13 300	3372	0,5	1057/788	530/395	353/263
5	1,18	696	3461	2355	1,4	725/541	368/274	246/183
7	1,66	322	1250	1589	2,5	465/348	245/183	165/123
10	2,37	141	421	966	4,6	240/189	143/107	99/74
15	3,55	57	140	557	7,9	102/87	73/56	54/40
20	4,73	32	73	392	10,7	58/51	45/36	36/27
30	7,10	16	35	248	14,3	29/26	24/20	20/16

* Позначено надближню зону ($Z < 1{,}0$ м/кг$^{1/3}$), де конструкція зазнає локального пробиття, бризантного сколювання та прямого динамічного зрізу біля опор раніше, ніж розвивається згинальна реакція. Порівняння з нормами ДБН тут є суто орієнтовним.

7.3. Інженерно-експертні висновки спрощеної методики

1. **Редукція навантаження:** На дистанціях $R = 5...30$ м еквівалентне довге навантаження становить лише $5...75\%$ від пікового відбитого тиску P_r. Це означає, що капітальна споруда цивільного захисту, розрахована за нормами ДБН В.2.2-5:2023 на клас А-IV (100 кПа), здатна витримати імпульсну дію короткої хвилі від БЧ 90 кг із піковим тиском понад 400 кПа (на дистанціях $R \geq 10...14$ м).
2. **Методичні застереження експертизи:**
   - **Зріз і пробиття:** Зниження навантаження за рахунок коефіцієнта динамічності стосується **виключно згинальної несучої здатності**. Для запобігання крихкому руйнуванню прямий зсув біля опор (*Direct Shear*) та локальне сколювання тильного шару повинні перевірятися на повний піковий тиск P_r.
   - **Комплексність ураження:** На дистанціях $R > 15...20$ м, де загальна згинальна міцність стін гарантовано забезпечена, вирішальним

фактором небезпеки для людей стає масове руйнування скління та первинні уламки корпусу БЧ, які зберігають забійну силу ($E_k \geq 79$ Дж) на відстанях до 150...200 м і більше.

ВИСНОВКИ

У науково-технічному звіті розв'язано прикладне завдання щодо створення уніфікованої інженерної методики розрахунку коефіцієнта динамічності ($K_{\text{дин}}$) та еквівалентного статичного навантаження ($P_{\text{екв}}$) для згинальних залізобетонних конструкцій захисних споруд цивільного захисту за вимогами Розділу 14 ДБН В.2.2-5:2023, гармонізації положень стандарту UFC 3-340-02 та встановлення спрощеного інженерного апарату експертної оцінки стійкості будівель під дією бойових частин засобів повітряного нападу з урахуванням критеріїв постанови Кабінету Міністрів України від 04.09.2026 № 1092.

За результатами проведених досліджень, аналітичних виведень та розрахунків сформульовано такі науково-технічні висновки:

1. Щодо фізичного розмежування режимів динамічного навантаження та визначення $K_{\text{дин}}$

1. **Замкнена аналітична тригілкова модель:**

– Доведено, що застосування єдиного коефіцієнта динамічності без урахування безрозмірної тривалості $\theta_0 = \tau/T$ веде до грубих помилок проєктування. Обґрунтовано та математично формалізовано розподіл динамічного відгуку за трьома режимами: імпульсним ($\tau/T < 0{,}3$), динамічним проміжним ($0{,}3 \leq \tau/T \leq 2{,}0$) та квазістатичним ($\tau/T > 2{,}0$).

– Для короткоімпульсного режиму дії БЧ ($\tau \approx 1...15$ мс) встановлено аналітичну залежність $K_{\text{дин}} = \frac{\pi \cdot (\tau/T)}{\sqrt{2\mu - 1}}$, яка безпосередньо випливає із закону збереження кінетичної енергії та питомого імпульсу навантаження.

2. **Вплив динамічної пластичності (μ):**

– Доведено, що врахування пластичної роботи розтягнутої арматури на межі текучості за вимогами ДБН В.2.2-5:2023 та UFC 3-340-02 (допустимі рівні $\mu = 2{,}0...3{,}0$ для збереження герметичності та $\mu = 4{,}0...6{,}0$ для запобігання

обваленню) знижує розрахунковий коефіцієнт динамічності до $K_{\text{дин}} \approx 0{,}30...0{,}40$ для плит перекриття. Це усуває штучне перевитрачання сталі та завищення товщин залізобетону при проєктуванні укриттів під реальні загрози ЗПН.

2. Щодо взаємодії хвилі з конструкціями різної просторової орієнтації

1. **Горизонтальні плити перекриття (дифракційне ковзання):**

– Встановлено, що перекриття зазнають дії вільної падаючої хвилі $P_m = \Delta P_{\Ф}$. Завдяки більшому прольоту ($L = 4{,}5...6{,}0$ м) та інерційній піддатливості ($T \approx 35...45$ мс) плита працює в імпульсній зоні ($\tau/T \approx 0{,}20...0{,}25$), що забезпечує зниження пікового тиску від БЧ (наприклад, $\Delta P_{\Ф} = 135$ кПа) до помірного еквівалентного статичного навантаження $P_{\text{екв}} \approx 45$ кПа.

2. **Вертикальні фасадні стіни (нормальний відбитий удар):**

– Доведено, що для відкритих вертикальних стін навантаження багаторазово зростає за рахунок двох факторів: формування тиску нормального відбиття $P_m = P_r$ ($C_r \approx 3...8$) та підвищеної жорсткості стіни ($H \approx 3{,}0$ м, $T \approx 15...20$ мс).

– Співвідношення τ/T для стін зміщується в динамічну область ($\tau/T \approx 0{,}5...0{,}6$), де $K_{\text{дин}} \rightarrow 0{,}90...1{,}05$, а еквівалентний тиск сягає $P_{\text{екв}} \approx 380...400$ кПа (у 8–9 разів більше, ніж для перекриття). Обґрунтовано обов'язковість захисного обвалування стін ґрунтом (де діє лише бічний тиск $\xi \cdot \Delta P_{\Ф}$) або збільшення товщини відкритих стін до $500...600$ мм.

3. Щодо розмежування механізмів руйнування та небезпеки опорного зрізу

1. **Категоричне відокремлення прямого зрізу (*Direct Shear*):**

– Доведено неприпустимість використання редукованого пластичного навантаження $P_{\text{екв}}$ або $P_{\text{дов,екв}}$ для перевірки опорних ділянок на поперечну силу.

– Руйнування бетону на прямий зріз біля опор має крихкий характер і відбувається за час $t < 0{,}5$ мс (до включення згинальної пластичності). Встановлено, що перевірка на прямий зріз за формулою Біггса ($V_{\max} = 0{,}38 r_u$

$L + 0{,}12P_mL$) та критерієм UFC 3-340-02 ($V_d = 0{,}18f'_{dc}bd$) повинна виконуватися суто в пружній постановці ($\mu = 1{,}0$) на повну амплітуду тиску P_m.

2. **Локальні ефекти надближньої зони ($Z < 1{,}0$ м/кг$^{1/3}$):**

– Обґрунтовано, що при дистанціях $R \leq 3...4$ м загальний згин не є вирішальним: руйнування визначається контактним бризантним пробиттям (*breaching*), відколом захисного шару тильної грані бетону (*spalling*) та зрізом опор, які повинні розраховуватися за спеціальними номограмами розділу 4-55 UFC 3-340-02 автономно від норм ДБН.

4. Щодо спрощеної методики експертної оцінки цивільних будівель (Розділ 7)

1. **Фізична валідність формули еквівалентного довгого навантаження:**

– Підтверджено математичну точність і фізичну обґрунтованість спрощеної формули перерахунку відбитого імпульсу БЧ у квазістатичний тиск ДБН: $P_{\text{дов,екв}} = \frac{2\pi \cdot i_r}{T} \cdot \frac{\sqrt{2\mu - 1}}{2\mu}$.

– Розрахунково доведено, що еквівалентне довге навантаження на дистанціях $R = 5...30$ м становить лише $5...75\%$ від пікового відбитого тиску P_r. Це фізично пояснює високу стійкість капітальних споруд до близьких підривів ЗПН: укриття, запроєктоване на клас А-IV (100 кПа), витримує ударну хвилю від БЧ 90 кг із піковим тиском понад 400 кПа на відстанях $R \geq 10...14$ м.

2. **Комплексний характер захищеності за огинальною (R^*):**

– Доведено, що фугасна небезпека руйнування несучих стін від БЧ масою 90 кг обмежується радіусом $15...20$ м, тоді як на більших відстанях вирішальними факторами небезпеки стають вторинні уламки скління (зона суцільного руйнування — понад $100...150$ м) та первинні забійні уламки сталевої оболонки ($E_k \geq 79$ Дж на дальностях до $180...200$ м і більше).

– Обґрунтовано правило вибору безпечних внутрішніх приміщень: захист людей без зведення окремих сховищ забезпечується не посиленням фасадів, а розміщенням усередині будівлі за щонайменше двома масивними стінами без віконних прорізів.

5. Щодо метрологічної валідації та рекомендацій до впровадження

1. **Чотирирівневий контур верифікації:**

- Сформовано стандартизовану програму перевірки методики, що включає крос-нормативний бенчмаркінг із комплексом SBEDS (допустиме відхилення $\leq 8\%$), числове гідродинамічне моделювання в LS-DYNA (відхилення за піковим прогином $\leq 15\%$) та схему стендового вибухового експерименту з оптичною DIC-фіксацією камерами Photron FASTCAM і вимірюванням тисків п'єзодатчиками Dytran 2300V5 через осцилографи PicoScope.

– **Рекомендації для органів сектору безпеки, ДСНС та проєктних організацій:**

- *Проєктним інститутам:* використовувати Розділи 1–5 цієї методики для підбору робочого поздовжнього армування та перевірки поперечного зрізу конструкцій захисних споруд цивільного захисту при розробленні розділів ІТЗ ЦЗ та СТУ.

Експертним службам та підрозділам цивільного захисту: застосовувати положення Розділу 7 для експрес-оцінки придатності наявного фонду підвальних приміщень і паркінгів як споруд подвійного призначення під час утилізації загроз ЗПН у межах вимог постанови КМУ від 04.09.2026 № 1092.

Розроблено науково-дослідним управлінням розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України

полковник Олександр ЛАРІН

полковник Едуард ОСТАПЧУК

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ТА ДЖЕРЕЛ

1. **ДБН В.2.2-5:2023.** Захисні споруди цивільного захисту. -К. : Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України, 2023. -154 с.
2. **UFC 3-340-02.** Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. -Washington, D.C. : U.S. Department of Defense, 2008 (Change 2, 2014). -1750 p.
3. **PDC-TR 06-08.** Single Degree of Freedom Structural Response Limits for Antiterrorism Design. -Omaha : U.S. Army Corps of Engineers, Protective Design Center, 2008.
4. **ASCE/SEI 59-11.** Blast Protection of Buildings. -Reston : American Society of Civil Engineers, 2011.
5. **Biggs, J. M.** Introduction to Structural Dynamics. -New York : McGraw-Hill, 1964. -341 p.
6. **ГОСТ В 25801–83.** Боеприпасы. Метод определения характеристик параметров воздушной ударной волны при взрыве боеприпаса.
7. **UN SaferGuard/IATG 01.80.** International Ammunition Technical Guidelines. Guide to quantity-distance relationships. -UNODA, 2021.
8. **Постанова Кабінету Міністрів України від 04.09.2026 № 1092.** Деякі питання оптимізації захисту населення та реагування на загрози засобів повітряного нападу.
9. **Baker, W. E., Cox, P. A., Westine, P. S. et al.** Explosion Hazards and Evaluation. -Amsterdam : Elsevier, 1983. -807 p.
10. **Kingery, C. N., Bulmash, G.** Airblast Parameters from Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst : BRL-TR-02555. -Aberdeen Proving Ground, MD, 1984.