

Кочкаръов Д. В., д.т.н., професор (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне), **Азізов Т. Н., д.т.н., професор** (Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини)

РОЗРАХУНОК НА ПРОБИТТЯ УЛАМКАМИ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗАХИСНИХ СПОРУД

У статті розглянуто сучасні методики розрахунку на пробиття уламками огороджувальних конструкцій захисних споруд. Проведено огляд літературних джерел та передумов розрахунку огороджувальних конструкцій захисних споруд на пробиття уламками. Розглянуто феноменологічні підходи до розрахунку на пробиття уламками огороджувальних конструкцій захисних споруд. Показано можливість проведення спрощених розрахунків на пробиття, а також наведено наближені параметри основних розрахункових формул. Наведено методику чинних норм проєктування та вказано на основні її передумови використання. Розглянуто порядок розрахунку на пробиття уламками за чинними нормами проєктування.

Ключові слова: уламки; початкова швидкість уламка; захисні споруди; коефіцієнт піддатливості проникненню матеріалу; маса тротилового еквівалента.

Аналіз досліджень і постановка задачі. Проєктування та розрахунок захисних споруд цивільного захисту передбачає розрахунок їх огороджувальних конструкцій на пробиття уламками. У загальному існує два основних підходи по розрахунку на пробій захисних огороджувальних конструкцій. Перший підхід полягає у використанні сучасних методів розрахунку на пробій із використанням теорій механіки твердого тіла, як правило, на основі методу скінчених елементів. Такі підходи реалізовані у сучасних програмних комплексах (ANSYS EXPLICIT DYNAMICS, ANSYS LS-DYNA, ANSYS AUTODYN та інші) [3; 5]. Вони найбільш повно моделюють процеси пробиття та враховують велику кількість факторів при розрахунку. До основних недоліків даного підходу можна віднести наступні: необхідність повного моделювання як захисної споруди так і уламка або боеприпасу, необхідність відповідного вибору та корегування сітки скінчених елементів, необхідність проведення

багатоваріантності розрахунків (під різним кутом, із різних сторін і т.д.). До переваг такого підходу варто віднести високу точність розрахунку на пробивання за відомих всіх геометричних та фізичних параметрів необхідних для виконання розрахунку на пробивання.

Другий підхід полягає у використанні наближених експериментально-емпіричних формул (феноменологічний підхід), які отримані на великій кількості експериментальних даних. Як правило, такі формули містять не велику кількість основних параметрів уламка та захисної стінки. Вони дозволяють доволі швидко виконувати розрахунки на пробивання та встановлювати необхідну товщину захисної товщі. До недоліків варто віднести низьку точність та певну умовність розрахунку на пробій. До основних параметрів при виконанні розрахунку на пробій належать: швидкість підходу уламка до захисної споруди, параметри форми уламка, кут, під яким уламок проникає у захисну споруду, маса уламка, калібр уламка і т.д. Складність виконання розрахунків захисних споруд на пробивання полягає у тому, що наведені параметри, як правило, невідомі, а тому можливість виконання точних розрахунків доволі сумнівна.

Таким чином, **метою статті** є розробка методики розрахунку огорожувальних конструкцій на пробиття їх уламками.

Викладення основного матеріалу

Захисні споруди цивільного захисту розраховуються на дію ударної повітряної хвилі, як це передбачають чинні норми їх проєктування [4]. Розрахунок на дію ударної повітряної хвилі виконується за умови вибуху боєприпасу на певній відстані від бомбосховища. У такому випадку пряме попадання не розглядається. Розрахунок на пробиття уламками огорожувальних конструкцій захисних споруд цивільного захисту також, необхідно розглядати за умови вибуху на певній відстані від них. З огляду на це розглянемо два типи захисних споруд цивільного захисту (рис. 1).

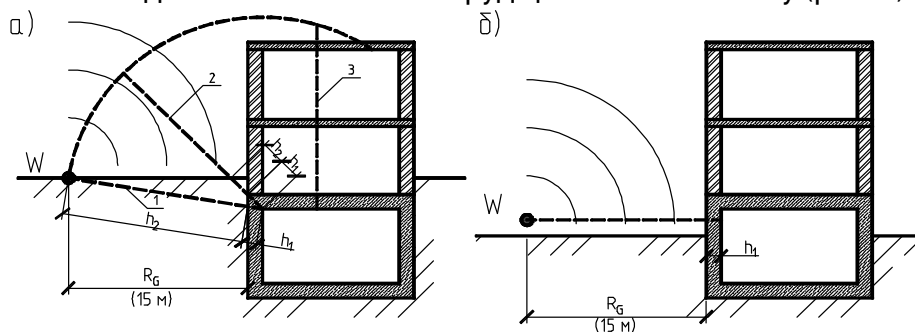


Рис. 1. До розрахунку на пробиття огорожувальних конструкцій захисних споруд уламками: 1) підземні споруди; 2) надземні споруди

Перший тип захисних споруд – підземний. У даному випадку, споруда знаходиться під землею. На рис. 1 похилими пунктирними лініями (поз. 1, 2, 3) показані можливі шляхи потрапляння уламків в середину споруди. Із всіх можливих випадків необхідно приймати найбільш несприятливий, тобто таких при якому наведена товщина захисного покриття найменша. У загальному для встановлення найбільш несприятливого випадку необхідно проводити визначення приведеної товщини захисного покриття по всім можливим шляхам руху уламків. В окремих випадках для спрощення нехтують додатковим захистом ґрунтових обсипок і приймають в розрахунок товщину огорожувальних конструкцій споруди цивільного захисту h_1 (див. рис. 1, б). Другий тип споруд передбачає надземне розташування споруди цивільного захисту (рис. 1, б). У такому випадку приймають до розрахунку, також товщину огорожувальних конструкцій споруди цивільного захисту h_1 (див. рис. 1, б).

Далі будемо розглядати феноменологічні підходи до виконання розрахунків на пробиття огорожувальних конструкцій захисних споруд уламками. Найбільш відомі вирази для знаходження товщини захисної товщі на пробивання приведені у табл. 1. У даних формулах: m – маса снаряду, кг; d – калібр снаряду, мм; V_c – швидкість підходу боєприпасу до захисної товщі, м/с; ψ_0 – кут, під яким снаряд проникає у захисну товщу, відраховується від нормалі до захисної поверхні; λ – коефіцієнт, який враховує форму головної частини снаряду та його калібр; k – коефіцієнт піддатливості проникненню матеріалу; n – коефіцієнт, який враховує можливе викривлення траєкторії руху снаряду в захисній товщі: для снарядів дальнобійної форми $n=1,82$, для снарядів не дальнобійної форми $n=2,62$.

За наведеними формулами при відомих відповідних параметрах можна встановити необхідну товщину або підібрати склад огорожувальних конструкцій захисної споруди. Зазначені залежності дійсні для швидкості підходу боєприпасу в межах 300-1000 м/с. В разі необхідності врахування більшої швидкості у розрахунках використовується приведена маса боєприпасу (кг), що визначається із рівності кінетичної енергії снаряду з швидкістю 1000 м/с до заданої швидкості уламків із пропорції:

$$m_{ekv} = m_f \frac{v_c^2}{10^6}, \quad (1)$$

де m_f – фактична маса тротилового еквівалента, v_c – швидкість боєприпасу або уламка більша за 1000 м/с.

Початкова швидкість та розмір фрагментів залежать від товщини металевого боєприпасу, форми вибухового заряду в цілому (сферична, циліндрична, призматична) та ділянок боєприпасу (кінець чи середина), з яких утворюються фрагменти. Розмір та форма фрагментів будуть значно залежати від металографічної історії оболонки, її фізичного стану (таких як вм'ятини, жолоби, внутрішні тріщини або дефекти) та стану з'єднань, особливо зварних швів [1; 2].

Таблиця 1

Формули для визначення товщини огорожувальних конструкцій на пробивання

№	Формула	Автори
1	$h = k \frac{q}{d^2} V_c \cos \psi_0.$	Формула Березанська
2	$h = \lambda k \frac{q}{d^2} V_c \frac{\cos(n\psi_0)}{\sqrt{\cos \psi_0}}.$	Формула АНІІ
3	$h = \frac{q \times \sin \theta_c}{2A \times B \times \Phi \times S} \ln \left(\frac{1 + BV_c^2}{1 + BV^2} \right), \Phi = (1,15 \dots 0,20) \frac{H_z}{d}$	Формула Забудського
4	$h = \lambda \frac{q}{d^2} K \left(\frac{V_c}{a_0} \right) 10^4, \lambda = (0,45 \dots 1,0) \frac{H_z}{d}; K \left(\frac{V_c}{a_0} \right) = 24 \frac{V_c}{a_0} e^{6,65 \left(\frac{V_c}{a_0} \right)}$	Балаганский І.А. та Мержневский Л.А.
5	$\begin{cases} \frac{h}{d} = \frac{1}{19,8} \sqrt{K_{NDRC} N_{NDRC} \frac{q}{d^{2,8}} \left(\frac{V_c}{1000} \right)^{1,8}} & \text{для } \frac{h}{d} \leq 2; \\ \frac{h}{d} = \frac{1}{1,56 \times 10^3} K_{NDRC} N_{NDRC} \frac{q}{d^{2,8}} \left(\frac{V_c}{1000} \right)^{1,8} + 1 & \text{для } \frac{h}{d} > 2. \end{cases}$	Національний комітет дослідження оборони США
6	$\frac{h}{d} = \frac{11,1}{\sqrt{f_c}} \frac{q}{d^{2,785}} \left(\frac{V_c}{1000} \right)^{1,5} + 0,5.$	Армійський корпус інженерів США
7	$h = 18 \times 10^{-6} S_Y N_Y \left(\frac{4q}{\pi d^2} \right)^{0,7} (V_c - 30,5) \text{ для } V_c \geq 61 \text{ м/с.}$	Young
8	$\begin{cases} \frac{h}{d} = \sqrt{\frac{4kI/\pi}{(1+I/N)}} & \text{для } \frac{h}{d} \leq k; \\ \frac{h}{d} = \frac{2}{\pi} N \sqrt{\frac{1+I/N}{1+k\pi/(4N)}} + k & \text{для } \frac{h}{d} > k. \end{cases}$	Li та Chen

Початкова швидкість первинних фрагментів, які виникають внаслідок вибуху з рівномірно розподіленими вибуховими

речовинами, визначається за методом Герні [1]:

$$V_0 = (2E')^{1/2} \times \left[\frac{W/W_c}{1 + 0.5W/W_c} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

де V_0 – початкова швидкість фрагментів; $(2E')^{1/2}$ – стала енергії Герні; $W = 1.2W_{ACT}$ – маса конструктивного заряду; $W_c = W_{CO} + W_{CI} + W_A$ – маса оболонки боєприпасу; W_{ACT} – фактична кількість вибухової речовини; W_{CO} – маса зовнішньої оболонки; W_{CI} – маса внутрішньої оболонки; W_A – маса рідини.

Значення сталої енергії Герні для різних типів вибухових речовин приведено у табл. 2.

Таблиця 2

Параметри вибухових речовин [1]

Вибухова речовина	$(2E')^{1/2}, ft/sec$	$B, in^{-7/6}$
Composition B	9100	0.222
Composition A-3, C-3	8800	0.220
HMX-1, HMX-2	9750	0.256, 0.323
PETN	9600	0.248
RDX	9600	0.212
Tetryl	8200	0.272
TNT	8000	0.312

Швидкість уламка на певній відстані від центру детонації внаслідок вибуху (циліндричного боєприпасу) з рівномірно розподіленими вибуховими речовинами, визначається за виразом:

$$V_s = V_0 \times e^{-\left[0.004R_f / W_f^{1/3}\right]}, \quad (3)$$

де R_f – відстань від центру детонації; W_f – маса уламка.

Маса найбільшого уламка визначається за виразом

$$W_f = \left[M_A \ln(8W_c / M_A^2) \right]^2, \quad (4)$$

де $M_A = B \times t_c^{5/6} \times d^{1/3} (1 + t_c / d)$ – фактор розподілу фрагментів; B – вибухова константа; t_c – середня товщина оболонки; d – середній внутрішній діаметр оболонки.

Наведені вирази (1)–(4) дають можливість встановлювати основні параметри уламків боєприпасів.



Порядок розрахунку конструкцій на пробиття за наведеними виразами наступний:

1. Встановлюємо ймовірний тип боєприпасу, на вибухову дію якого буде проводитись розрахунок на пробиття огорожувальних конструкцій захисних споруд. Встановлюємо всі необхідні параметри боєприпасу;
2. Приймаємо певну відстань від центру детонації до захисної споруди;
3. Визначаємо початкову швидкість первинних фрагментів, які виникають внаслідок вибуху за виразом (2);
4. Визначаємо масу найбільшого уламка за виразом (4);
5. Визначаємо швидкість уламка на заданій відстані від центру детонації за виразом (3);
6. Приводимо шари комплексної конструкції до одного шару (як правило до бетону міцності С20/25);
7. Визначаємо необхідну товщину шару бетону за одним із виразів наведених у табл.1;
8. Порівнюємо приведену товщину із необхідною. За необхідності виконуємо коригування шарів огорожувальної конструкції захисної споруди.

Основна складність розрахунку захисних споруд на пробивання уламками полягає в тому, що наперед невідомий тип застосування боєприпасу. До того ж вони можуть бути певним чином модифіковані, а також містити різний тип вибухової речовини. Тому такий розрахунок у більшості випадків є доволі наближеним та умовним. Для ще більш наближених оцінок опору пробивання огорожувальних конструкцій уламками можна рекомендувати наступні наближені параметри:

1. Швидкість уламків у середньому можна приймати 2000 м/с;
2. Маса уламків:
 - для крилатих ракет середньої дальності, таких як ракети класу «повітря–земля», уламки можуть сягати від 5% до 15% від загальної маси ракети.
 - для балістичних ракет, таких як «Кінжал», частка уламків може бути біля 20%.
 - для великих крилатих ракет, таких як крилаті ракети середньої та великої дальності, частка уламків може бути в межах 10–30% від загальної маси.
 - для мінометів 129, 150 калібру відсоткова частка уламків загальної маси зазвичай складає 5–10%.
 - для дронів типу Shahed 136 частка уламків може складати від 1

до 10% від його загальної маси.

Окреме складне питання стосується форми уламка. Форму уламка визначають відповідні коефіцієнти λ або N_{NDRC} . Визначення значення даних коефіцієнтів та приведених діаметрів уламків детально описано у [1]. Окремі наближені формули розрахунку на пробій (Березанська) приймають осереднене значення коефіцієнта, який визначає форму уламка.

У чинних нормах проєктування застосовано також спрощений підхід по розрахунку огорожувальних конструкцій на пробивання їх уламками. Попередньо були виконані розрахунки на пробивання уламками від окремих найбільш потужних боєприпасів одношарової бетонної конструкції з класу бетону С20/25 за різними методиками розрахунку. Таким чином була встановлена усереднена величина прийнятої товщини стіни, яка й була прийнята у нормах проєктування [4]. Всі інші шари огорожувальних конструкцій умовно приводяться до показників прийнятої стіни. Таким чином приведена товщина всіх шарів визначається за виразом

$$h = \sum (h_i \times k_i) \geq 330 \text{ мм}, \quad (5)$$

де h_i – фактична або проєктна товщина i -го шару огорожувальної конструкції, мм; k_i – приведений коефіцієнт матеріалу піддатливості проникненню для i -го шару огорожувальної конструкції, приймаються за [4].

Наведемо порядок розрахунку конструкцій на пробиття за чинними нормами проєктування:

1. Приймається конструктивна схема огорожувальної конструкції захисної споруди. Попередньо приймаються із конструктивних міркувань всі необхідні шари та їх товщини.
2. Для кожного шару знаходяться приведений коефіцієнт матеріалу піддатливості проникненню.
3. За виразом (5) визначається приведена товщина всіх шарів.
4. У випадку не виконання умови (5) необхідно збільшити товщини огорожувальних конструкцій захисних споруд та виконати розрахунок з новими значеннями товщини.

Висновки і перспективи досліджень

Розглянуті основні феноменологічні підходи до розрахунку до розрахунку на пробиття уламками огорожувальних конструкцій захисних споруд. Показано особливості визначення основних параметрів при розрахунку на пробиття уламками огорожувальних конструкцій захисних споруд. Наведено спрощену методику визначення необхідної товщини огорожувальних конструкцій

захисних споруд. Надані рекомендації щодо спрощеного визначення необхідних параметрів для різних типів боєприпасів. На основі натурних досліджень у подальшому рекомендується встановити більш уточнені параметри уламків сучасних боєприпасів.

1. Unified Facilities Criteria. UFC 3-340-02 Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency. 2008.
2. Kingery C. N., Bulmash G. Technical report ARBRL-TR-02555: Air blast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical burst, AD-B082 713, U.S. Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD. 1984.
3. Yan S., Wang J.-H., Wang D., Zhang L. Mechanism analysis on progressive collapse of RC frame structure under blast effect. Gongcheng Lixue. *Engineering Mechanics*. 2009. No. 26 (SUPPL. 1). Pp. 119–123, 129.
4. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту.
5. Hakan Hansson. Warhead penetration in concrete protective structures. Licentiate Thesis. Stockholm, 2011. 188 с.

REFERENCES:

1. Unified Facilities Criteria. UFC 3-340-02 Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency. 2008.
2. Kingery C. N., Bulmash G. Technical report ARBRL-TR-02555: Air blast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical burst, AD-B082 713, U.S. Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD. 1984.
3. Yan S., Wang J.-H., Wang D., Zhang L. Mechanism analysis on progressive collapse of RC frame structure under blast effect. Gongcheng Lixue. *Engineering Mechanics*. 2009. No. 26 (SUPPL. 1). Pp. 119–123, 129.
4. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту.
5. Hakan Hansson. Warhead penetration in concrete protective structures. Licentiate Thesis. Stockholm, 2011. 188 с.

Kochkarov D. V., Doctor of Engineering, Professor (National University of Water and Environment Engineering, Rivne), **Azizov T. N., Doctor of Engineering, Professor** (Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, Uman)

CALCULATION OF FRAGMENT PENETRATION OF PROTECTIVE STRUCTURES' ENCLOSING ELEMENTS

The main phenomenological approaches to calculating the penetration of protective structures by fragments have been

reviewed. It is worth noting that the most accurate calculations, which align with the physical understanding of material behavior during penetration, correspond to the main methods based on solid mechanics. Such methods are implemented in many software packages and are not discussed in detail in this article.

The article presents the main premises of the phenomenological approaches for these calculations. It examines both underground and above-ground placement of protective structures and highlights the specifics of calculating the penetration of their enclosing structures by fragments. Generally, the thickness of the enclosing structure of a protective facility depends on parameters such as the mass of the fragment, the shape of the fragment, the speed of the fragment as it approaches the protective layer, the effective diameter of the fragment, and the parameters of the protective layer.

The procedure for calculating the penetration of enclosing structures using the given methods is presented. This calculation procedure allows verifying the sufficiency of the thickness of the layers in the enclosing structures of protective facilities. The article discusses the calculation methodology outlined in current design standards. The essence of this methodology involves reducing various layers of the protective thickness of enclosing structures to a single-layer structure made of concrete of class C20/25. The thickness of this single-layer structure is established through comprehensive calculations using various phenomenological approaches for the most powerful munitions. The reduction of different layers of protective thickness to a single-layer structure is carried out using an equivalent coefficient of material susceptibility to penetration for the respective protective layer. The thickness of the elements is determined in the direction of the most unfavorable possible fragment impact. This approach significantly simplifies the calculation of fragment penetration of protective structures and allows for the verification of design decisions. Its use does not require determining the parameters of the munitions, which are usually unknown. However, it is important to note its approximate and conditional nature.

Recommendations are provided for the simplified determination of necessary parameters for various types of munitions, and the procedure for calculating enclosing structures using the simplified methodology of current design standards is outlined.

Keywords: Fragments; initial velocity of the fragment; protective structures; material penetration compliance coefficient; TNT equivalent mass.