

**РОЗРАХУНОК ПОШКОДЖЕНОЇ ВИБУХОМ БЕТОННОЇ СТІНИ НА
ПРОНИКНЕННЯ УЛАМКІВ ЗА МЕТОДИКОЮ UFC 3-340-02**

**CALCULATION OF A CONCRETE WALL DAMAGED BY AN
EXPLOSION FOR FRAGMENT PENETRATION ACCORDING TO
THE UFC 3-340-02 METHODOLOGY**

Остапов І.С. аспірант. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6150-5518>;
Семко П.О. к.т.н., доц. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5915-3082>,
(Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія
Кондратюка»); **Скляренко С.О.** к.т.н., доц. ORCID ID
<https://orcid.org/0000-0002-3929-4240>, (Державний університет «Київський
авіаційний інститут»)

Ostapov I PhD student. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6150-5518>;
Semko P. PhD, Assoc. Prof. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5915-3082>,
(National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»);
Skliarenko S PhD, Assoc. Prof.. ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-3929-4240>, (National University "Kyiv Aviation Institute")

У статті розглянуто розвиток будівельних норм щодо проєктування конструкцій, стійких до вибухових впливів, у США та Європі. Проаналізовано історичні передумови, що сприяли формуванню сучасних стандартів, зокрема UFC 3-340-02 та Єврокодів. Особливу увагу приділено методичі розрахунку ураження огорожжючих конструкцій уламками, що утворюються під час вибуху. Наведено алгоритм визначення необхідної товщини стін для запобігання пробиттю та виколюванню матеріалу, з урахуванням характеристик вибухових снарядів. Запропоновано рекомендації щодо вдосконалення методології проєктування конструкцій з урахуванням стійкості до вибухових впливів.

The article examines the evolution of building codes for designing structures resistant to blast effects in the United States and Europe. It analyzes the historical background that contributed to the development of modern standards, particularly UFC 3-340-02 and the Eurocodes. Special attention is given to the methodology for assessing damage to protective structures caused by fragments generated during explosions. An algorithm is presented for determining the required wall thickness to prevent perforation and spalling, taking into account the characteristics of explosive projectiles. The

study offers recommendations for enhancing the design methodology of blast-resistant structures.

Ключові слова

Вибухостійкість, вибух, стіна, хвиля, навантаження, опір, пробиття, виколування, захист, безпека.

Blast resistance, explosion, wall, blast wave, load, resistance, perforation, spalling, protection, safety.

Вступ. Розвиток будівельних норм проектування конструкцій з урахуванням вибухових впливів у США та Європі зумовлений історичними подіями, технологічним прогресом і змінами у соціальних потребах.

Під час Холодної війни зростання загрози ядерних ударів спонукало до створення укриттів для цивільного населення та військових баз. Тому було розроблено стандарти проектування для укриттів та бункерів, що стали основою для сучасного UFC 3-340-02 [1]. Після того, впроваджені стандарти UFC 4-010-01 [2] та інші документи, які зосередилися на мінімізації жертв у разі вибухів.

У межах ЄС об'єднання зусиль сприяло розробці Єврокодів для уніфікації норм безпеки. Тому для оцінки стійкості до вибухових впливів будівельних конструкцій та елементів створили стандарти EN 13123 [3] та EN 13124 [4] (випробування вибухостійких вікон, дверей і конструкцій), а загальні стандарти EN 1991-1-7 [5] включають в себе принципи проектування при випадкових навантаженнях, включаючи вибухи.

Актуальність теми полягає в тому, що розрахунок огорожувальних конструкцій, зокрема стін, є життєво важливою задачею для забезпечення безпеки людей та збереження майна.

Аналіз останніх досліджень. Вітчизняними вченими проведена значна робота щодо аналізу дії ударної хвилі, що включає вивчення її параметрів, механізмів руйнування матеріалів і структур, а також методів підвищення стійкості будівельних конструкцій до вибухових впливів [6-8]. Однак, хоча певна увага приділяється й дослідженням ураження уламками [9, 10], увага до цього аспекту вибухового впливу залишається менш вивченим порівняно з ударною хвилею. Також ведуться дослідження, які вивчають синергетичний ефект від сумісного впливу ударної хвилі та первинних уламків одночасно [11]. Але такі дослідження є більш складними та трудомісткими.

Мета роботи та постановка задачі

Мета роботи полягає у тому, щоб запропонувати алгоритм та показати як проводиться розрахунок на ураження огорожувальної конструкції (стіни) уламками від вибуху, використовуючи методику за UFC 3-340-02. Для цього буде наведено приклад для двох типів снарядів, а саме: артилерійської

міни ОФ-843Б та авіаційної бомби ФАБ-500 М62. У результаті буде отримано значення проникнення первинного уламку від снаряду у стіну, а також мінімально необхідні товщини стіни для запобігання пробиття, коли розрахована глибина проникнення фрагмента у стіну з бетону нескінченної товщини менший, ніж у стіну кінцевої товщини, а також виколювання із зворотньої сторони, коли напруження від удару утворює хвилю стиснення, яка поширюється від точки удару, поки не досягне задньої грані, що сприятиме відколювання бетону на поверхні зі зворотньої сторони.

Викладення основного матеріалу

UFC 3-340-02 "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions" є настановою, розробленою інженерним корпусом армії США (US Army Corps of Engineers) для проектування будівель та споруд, стійких до впливу від вибухів. Цей документ набув широкого поширення та визнання у світі завдяки своїй комплексності та науково обґрунтованості. Даний нормативний документ охоплює всі стадії вибухового впливу: початкову вибухову хвилю, вплив від уламків, прогресуюче руйнування. Методика розрахунку уламкового ураження використовує детальні емпіричні формули для визначення параметрів уламків (швидкість, маса, щільність розповсюдження). Натомість, ДБН В.2.2-5:2023 [12] основний акцент робить на стійкість до тиску вибухової хвилі, а також в них обмежені дані щодо уламкового ураження. Уламкове ураження враховується менш детально, переважно через спрощені емпіричні коефіцієнти, наприклад, в Таблиці 14.13.

Для прикладу розрахуємо бетонну стіну на проникнення уламків та сколювання зі зворотного боку від ураження після вибуху одних із найчастіше застосовуваних засобів ураження (міна 120мм ОФ-843Б, авіаційна бомба 152мм ФАБ-500 М62). Основний фокус буде приділено на сам розрахунок. Величини вихідних даних буде переведено із системи SI в імперську (британську) систему, так як нормативний документ використовує саме таку систему.

Далі буде наведено алгоритм з розділів даного нормативного документу, в якому описано розрахунок від ураження первинними уламками (термін "первинний уламок" означає уламок гільзи або контейнера вибухової речовини або фрагмент предмета, який контактував з вибуховою речовиною, в той же час "вторинні уламки" утворюватися внаслідок вибуху при взаємодії вибухової хвилі з об'єктами або конструкціями, розташованими поблизу джерела вибуху, тобто, частини конструкцій, машин, дрібні інструменти, тощо.).

Задачу пропонується вирішувати у декілька етапів, а саме:

- підготовка вихідних даних снарядів для подальших уламків, які виникають внаслідок вибуху;

- розрахунок параметрів уламків, таких як розмір уламків, їх швидкість та маса;
- розрахунок глибини проникнення уламку, знаходження мінімально необхідної товщини стіни для уникнення пробиття, знаходження мінімально необхідної товщини стіни для уникнення виколування.

Етап 1. Підготовка вихідних даних снарядів для подальших уламків, які виникають внаслідок вибуху.

Початкова швидкість і розмір уламків залежать від товщини металевого контейнера, форми боєприпасу в цілому (сферична, циліндрична, призматична) і секції контейнера (на кінці та посередині), з яких утворюються фрагменти. Тож, до таблиці буде занесено такі дані про снаряд, як маса оболонки снаряду W_C , реальна маса вибухового заряду W_{ACT} , середній внутрішній діаметр снаряду d_i , реальна товщина стінки снаряду t_C , а також густина металу, з якого виготовлено снаряд. Для визначення розрахункової маси заряду W за формулою з [1] застосовують 20-ти відсотковий коефіцієнт міцності:

$$W = 1,2 \cdot W_{ACT} \quad (1)$$

де: W_{ACT} – реальна маса вибухового заряду, кг;

Діаметр оболонки зазвичай збільшується перед розривом, і, отже, для збереження маси товщина оболонки повинна бути зменшена. Передбачається, що зовнішній діаметр збільшується в 1,5 рази від початкового діаметра. Тому, застосовуючи формули 2-49 та 2-50 із нормативного акту, знаходимо приведений внутрішній діаметр та приведену товщину стінки. Таким чином, приведений внутрішній діаметр:

$$d_i' = (1,25 \cdot (d_i + 2t_C)^2 + d_i^2)^{0,5} \quad (2)$$

де: d_i' – приведений внутрішній діаметр снаряду; d_i – справжній внутрішній діаметр снаряду; t_C – справжня товщина снаряду;

Приведена або «звужена» товщина стінки становить:

$$t_C' = 0,75(d_i + 2t_C) - 0,5d_i' \quad (3)$$

Таблиця 1

Параметри снарядів для розрахунку

Параметри	Снаряди	
	ФАБ-500 М62	ОФ-843Б
Маса оболонки снаряду W_C , фнт	634,93	32,19
Реальна маса вибухового заряду W_{ACT} , фнт	460,77	3,09
Розрахункова маса вибухового заряду W , фнт	552,92	3,70
Середній внутрішній діаметр снаряду d_i , дюйм	15,040	4,170

Продовження таблиці 1		
Приведений внутрішній діаметр снаряду d_i' , дюйм	23,157	6,796
Справжня товщина стінки снаряду t_c , дюйм	0,354	0,315
Приведена товщина стінки снаряду t_c' , дюйм	0,233	0,202
Густина металу оболонки снаряду ρ , фнт/дюйм ³	0,283	0,283

Етап 2. Розрахунок параметрів уламків.

Початкова швидкість первинних осколків у результаті детонації високого порядку циліндрична оболонка з рівномірно розподіленими вибуховими речовинами виражається за формулою 2-32:

$$V_0 = \sqrt{2E'} \cdot \left(\frac{\frac{W}{W_c}}{1 + 0,5 \cdot \frac{W}{W_c}} \right)^{1/2} \quad (4)$$

де: V_0 – початкова швидкість уламків, м/с; $\sqrt{2E'}$ – енергетична константа Герні, м/с із Table 2-5 [1]; W – розрахункова маса заряду, кг; W_c – маса оболонки; W_{ACT} – реальна маса вибухівки.

Форма та вага найбільшого фрагмента, отриманого в результаті детонації рівномірно розподіленої вибухової речовини в циліндричному металевому корпусі рівної товщини була розрахована відповідно до співвідношень, розроблених на основі теоретичних міркувань, підтверджених великою кількістю випробувань. Кількість уламків, утворених циліндричним гільзовим зарядом, вага яких перевищує розраховану вагу фрагменту визначається за формулами:

$$N_f = \frac{8W_c e^{-(W_f^{0.5}/M_A)}}{M_A^2} \quad (5)$$

а також

$$M_A = B t_c^{5/6} d_i^{1/3} (1 + t_c/d_i) \quad (6)$$

де: N_f – кількість фрагментів із масою, більшою за W_f ; W_c – маса оболонки; W_f – розрахункова маса фрагменту; M_A – фактор розподілення фрагментів; B – константа вибуху за таблицею 2-7 [1]; t_c – середня товщина стінки снаряду; d_i – середній діаметр всередині снаряду.

Найбільший фрагмент, утворений вибухом, можна знайти, встановивши $N_f = 1$. Таким чином, вага найбільшого фрагмента визначається як:

$$W_f = \left(M_A \ln(8W_C/M_A^2) \right)^2 \quad (7)$$

Встановлюючи вагу фрагмента W_f рівним нулю у рівнянні (5), отримуємо наступний вираз для отримання загальної кількості фрагментів:

$$N_T = 8W_C/M_A^2 \quad (8)$$

де: N_T – загальна кількість фрагментів.

Отже, середню масу частинок можна знайти:

$$W_f = 16W_C/N_T = 2M_A^2 \quad (9)$$

Коли вибух розташований поблизу об'єкта, то швидкість V_S , з якою уламок влучає в предмет, приблизно дорівнює початковій швидкості V_0 . Однак, якщо детонація знаходиться на відносно великій відстані від об'єкта, то швидкість удару уламку може бути значно меншою ніж відразу після вибуху. Ця швидкість удару виражається формулою 2-48 [1]:

$$V_S = V_0 \cdot e^{-(0,004R_f/W_f^{1/3})} \quad (10)$$

де: R_f – відстань від центру детонації.

Для прикладу встановимо, що сам вибух снаряду відбувся на відстані 50 футів (приблизно 15,24м) від бетонної стіни.

Розрахунки, отримані для відповідних даних снарядів з Таблиці 1 відображено у Таблиці 2.

Таблиця 2

Параметри уламку від снаряду

Параметри	Снаряди	
	ФАБ-500 М62	ОФ-843Б
Фактор розподілення фрагментів, M_A	0,266	0,206
Середня маса уламку W_f , унц	0,142	0,085
Розрахункова маса уламку W_f , унц	1,270	0,764
Розрахунковий діаметр уламку d , дюйм	11,72	1,60
Константа вибуху за В, унц ^{1/2} дюйм ^{-7/6}	0,250	0,312
Енергетична константа Герні $\sqrt{2E'}$, фт/с	8400	7600
Початкова швидкість первинного уламку V_0 , фт/с	6542,7	2506,9
Швидкість первинного уламку у момент удару V_S , фт/с	5439,5	2014,3
Відстань від місця вибуху до цілі R_f , фт	50	50

Етап 3. Розрахунок глибини проникнення уламку, знаходження мінімально необхідної товщини стіни для уникнення пробиття та виколювання.

Приклад розрахунку буде проводитись для стіни із бетону C20/25.

Загальний вираз для максимального проникнення в масивний бетон (плиту нескінченної товщини) бронебійним осколком може бути знайденим наступним чином за формулами 4-195 та 4-196 [1]:

$$X_f = 4 \cdot 10^{-3} (KND)^{0,5} d^{1,1} V_S^{0,9} \quad X_f \leq 2d \quad (11)$$

$$X_f = 4 \cdot 10^{-6} KND d^{1,2} V_S^{1,8} + d \quad X_f > 2d \quad (12)$$

Для уламку стандартної форми і міцності бетону f'_c що дорівнює 4000 psi також можна виразити за спрощеними формулами через його вагу як:

$$X_f = 1,92 \cdot 10^{-3} W_f^{0,37} V_S^{0,9} \quad X_f \leq 2d \quad (13)$$

$$X_f = 1,32 \cdot 10^{-6} W_f^{0,4} V_S^{1,8} + 0,695 W_f^{0,33} \quad X_f > 2d \quad (14)$$

Максимальне проникнення осколків у бетон з міцністю, відмінною від 4000 psi, може обчислювати за допомогою отриманого значення X_f з рівняння (14, 15) або рисунка 4-78 [1] і наступного рівняння 4-202 [1]:

$$X'_f = X_f \left(\frac{4000}{f'_c} \right)^{1/2} \quad (15)$$

Щоб оцінити проникнення у бетон металевих уламків, окрім бронебійних, треба застосувати коефіцієнт, що виражається через відносну твердість металу (здатність металу до опору деформації) і щільність як в рівнянні 4-203:

$$X'_f = k X_f \quad (16)$$

де: k – константа, яка залежить від металу оболонку, за таблицею 4-16; X_f – максимальне проникнення бронебійним уламком, з урахуванням міцності бетону з рівняння (16).

Досить часто величина початкової кінетичної енергії первинних уламків буде великою і може бути достатньою для перфорації бетону. Мінімальна товщина бетону, необхідна для запобігання перфорації може бути виражена:

$$T_{pf} = 1,13 X_f d^{0,1} + 1,311 d \quad (17)$$

Коли первинний фрагмент, що рухається з високою швидкістю, вдаряється об поверхню, то поблизу точки впливу виникає велике напруження стиску. Це напруження утворює хвилю стиснення, яка поширюється від точки удару, сферично розширюючись, поки не досягне задньої грані. На цій поверхні хвиля стиснення відбивається. Коли напруження в результуючій хвилі розтягу перевищують міцність бетону на

розтягнення, відбувається відколювання бетону на поверхні. Наведене нижче рівняння визначає необхідну товщину бетону для запобігання відколювання.

$$T_{sp} = 1,215X_f d^{0,1} + 2,12d \quad (18)$$

Аналогічно до попереднього етапу, всі результати розрахунків для відповідних снарядів занесено у таблицю 3.

Таблиця 3

Розрахунок проникнення уламку у стіну

Параметри	Снаряди	
	ФАБ-500 М62	ОФ-843Б
Міцність бетону, фнт/дюйм ² (МПа)	2901 (20)	2901 (20)
Максимальне проникнення в бетон міцністю 4000 фнт/дюйм ² , дюйм (мм)	4,83 (123)	1,64 (42)
Максимальне проникнення в бетон заданої міцності f'_c , дюйм (мм)	5,67 (144)	1,92 (49)
Максимальне проникнення в бетон заданої міцності не бронебійних осколків, дюйм (мм)	3,97 (101)	1,34 (34)
Необхідна товщина для запобігання пробиття, дюйм (мм)	21,10 (536)	3,69 (94)
Необхідна товщина для запобігання виколування матеріалу, дюйм (мм)	31,01 (788)	5,11 (130)

Висновки та рекомендації

В даній статті запропоновано алгоритм розрахунку огорожуючої конструкції (наприклад, стіни), використовуючи методики за UFC 3-340-02 та приведено приклад для снарядів циліндричної форми, уламки яких потрапляють у бетонну стіну. Таким чином визначено мінімально необхідну товщину для запобігання пробиття та виколування. Наприклад, для міни 120мм ОФ-843Б було визначено, що максимальне проникнення уламку буде 34мм. Для запобігання пробиття в даному випадку, стіна має бути товщиною 94мм, а для запобігання сколювання – 130мм. Слід зазначити, що методика оцінки глибини проникнення уламків згідно діючого ДБН В.2.2-5:2023 [12] не враховує розмір снаряду чи відстань до вибуху що може призвести до некоректної оцінки ситуації. Методика викладена в даній роботі дозволяє більш точно оцінити можливу глибину проникнення уламків.

Стаття виконана в рамках науково-технічної роботи «Ресурсоощадні технології прискореного відновлення пошкоджених будівель із влаштуванням захисних споруд цивільного захисту», (державний реєстраційний номер: 0125U000895).

1. Unified Facilities Criteria. (2008). “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.

2. UFC 4-010-01: DoD minimum antiterrorism standards for buildings. US Department of Defense, 2022. 95 p.

3. EN 13123-1 - 2001: Windows, doors and shutters - Explosion resistance - Requirements and classification - Part 1: Shock tube, 2001.

4. EN 13124-2:2004: Windows, doors and shutters - Explosion resistance - Test method - Part 2: Range test, 2004.

5. EN 1991-1-7 (2006) (English): Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-7: General actions - Accidental actions, 2006. 65p.

6. Максименко, В., Барабаш, М., Костира, Н., Бармін, І. (2024). МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ВИБУХОВОГО ТИПУ В ЗАДАЧАХ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ПК ЛІРА-САПР. *Наука та будівництво*, 38(4). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-4-2023-3>

7. Азізов Т.Н., Кочкар'єв Д.В. (2024). ВИКОРИСТАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ГНУЧКИХ НИТОК ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД ВИБУХОВОЇ ХВИЛІ. *Sciences of Europe* # 149 (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.13842704>

8. Ромашкіна, М., Пісаревський Б., Журавльов, О. (2024). Розрахунок будівлі на вплив дії повітряної ударної хвилі прямим динамічним методом з використанням ПК ЛІРА-САПР. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, (14), 147–160. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.14.2024.147-160>

9. Trasborg, P., Naito, C., Bocchini, P., & Olmati, P. (2016). Fragility analysis for ballistic design. *Structure and Infrastructure Engineering*, 13(9), 1105–1116. <https://doi.org/10.1080/15732479.2016.1244209>

10. Mykhailovskyi, D., Skliarov, I., Khomik, M., Vavilova, N., Skliarova, T. (2024). Analysis of methods for calculating the penetrating effect of the main types of missiles and fragmentation damage to the structures of protective constructions. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 113, 171-182. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.113.171-182>

11. Jia Yuan Lim, Chong Yik Melvin Goh, Kok Wei Kang, Jun Li, Chengqing Wu, Structural response of steel-concrete composite panels to near field simultaneous blast and fragmentation loading, *International Journal of Impact Engineering*, Volume 195, 2025, 105142, ISSN 0734-743X, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2024.105142>.

12. ДБН В.2.2-5:2023. Будинки і споруди. Захисні споруди цивільного захисту. – Чинний від 2023-08-01. – Київ: Мінрегіон України, 2023. – 76 с.