

УДК 725

ВПЛИВ ВИБУХОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА БУДІВЛІ ТА СПОРУДИ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ НАСЕЛЕННЯ

Г.М. Іванченко¹,
доктор техн. наук, професор

Г.В. Гетун¹,
канд. техн. наук, доцент

І.С. Безклубенко¹,
канд. техн. наук, доцент

А.В. Соломін²,
канд. фіз.-мат. наук, доцент

О.М. Постернак¹,
асистент

¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
Повітрофлотський просп., 31, м. Київ, Україна. 03680

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
проспект Перемоги, 37, м. Київ, Україна. 03068

DOI: 10.32347/2410-2547.2023.111.39-48

Анотація. У статті обґрунтована актуальність проектування і будівництва будівель і споруд цивільного захисту населення України в умовах можливих ударно-вибухових і вогневих уражень. Метою роботи є систематизація інформації про впливи вибухових навантажень на конструкції будівель та надання рекомендацій щодо покращення стійкості будівель і споруд цивільного захисту населення.

Розглянуті та систематизовані впливи ударної хвилі під час детонації вибухових речовин на конструкції будівель. Проаналізовані особливості розподілу тиску ударної хвилі на конструкції будівлі у часі, в залежності від їх відстані до епіцентру вибуху. Виявлені особливості впливу вибухової хвилі, яка поширюється від осередку детонації, на малоповерхові будівлі з плоскими покриттями і послідовність розвитку деформацій та руйнувань їх конструкцій на трьох етапах розповсюдження хвилі. Проаналізовано характер впливу вибухової хвилі на багатоповерхові і висотні будівлі та послідовність розвитку деформацій і руйнувань їх конструкцій. Наведені приклади руйнування конструкцій будівель різних конструктивних систем від вибухів.

У роботі надані рекомендації щодо проектування вибухостійких будівель з вбудованими бомбосховищами, які здатні чинити опір вибуховим впливам без прогресуючого колапсу, що призводить до появи каскадної послідовності пошкоджень суміжних конструкцій будівлі. Проаналізовані шляхи перерозподілу гравітаційних навантажень на конструктивні системи будівель та їх конструкції і наведені рекомендації щодо проектування вибухостійких будівель. Зроблені висновки про доцільність використання монолітних залізобетонних каркасів, які здатні пластично деформуватися, перерозподіляти зусилля і запобігати виникненню прогресуючого колапсу, який призводить до появи каскадної послідовності пошкоджень суміжних конструкцій будівлі.

Ключові слова: будівля, захисна споруда, навантаження, вибуховий вплив, ударна хвиля, конструкція, деформація, каркасна система, вузли залізобетонних рам.

Постановка проблеми і аналіз попередніх досліджень

29 липня 2022 року в Україні введено у дію Закон № 2486-IX «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо забезпечення вимог цивільного захисту під час планування та забудови територій», який вимагає від забудовників проектування та будівництва захисних споруд цивільного захисту або споруд подвійного призначення для об'єктів будівництва, які за класом наслідків (відповідальності) належать до об'єктів із середніми (СС2) та значними (СС3) наслідками, на яких постійно перебувають понад 50 фізичних осіб або періодично перебувають понад 100 фізичних осіб [2, 9, 14, 15]. Захисні інженерні споруди цивільного призначення для захисту населення від впливу небезпечних чинників та дії засобів ураження, які виникають внаслідок надзвичайних ситуацій, воєнних дій або терористичних актів, повинні проектуватися з врахуванням вимог пожежної та техногенної безпеки [1, 15, 17]. Найважливішим фактором

проектування захисних споруд є їх раціональне розміщення в структурі будівлі, що потребує злагодженої роботи архітекторів та інженерів конструкторів. На першому етапі проектування, коли архітектори розробляють об'ємно-планувальні рішення будівлі, призначають їх основні габаритні розміри, викреслюють плани і розрізи, необхідно раціонально розмістити укриття в об'ємі будівлі, узгодити з інженером-конструктором конструктивну систему і схему будівлі, вибрати матеріали основних несучих конструкцій будівлі та укриття, призначити їх орієнтовні розміри, зібрати навантаження і виконати подальші статичні та конструктивні розрахунки [2, 5, 15]. Надійність захисту людей в укриттях у першу чергу забезпечується міцністю несучих і огорожувальних конструкцій, а також створенням оптимальних санітарно-технічних умов для нормальної життєдіяльності укритих в них людей протягом двох діб [1, 14, 16].

Основні несучі конструкції захисних споруд цивільного захисту повинні витримувати всі види статичних і динамічних навантажень і впливів від можливих вибухів і детонацій. Навантаження від вибухів можна деяким чином порівнювати з навантаженнями, які виникають в результаті природних надзвичайних явищ, а саме: землетрусів, екстремальних навантажень від вітру (ураганів з тривалим періодом часу або торнадо малої тривалості). Характерною особливістю таких навантажень і впливів на конструкції будівлі є домінування горизонтальної складової навантаження над вертикальною [3, 7, 8, 13].

Мета публікації полягає в класифікації та систематизації навантажень і впливів на конструкції будівель від вибухів і детонацій.

Основне дослідження. Більшість руйнувань, завданих вибухом, викликається впливом ударної хвилі, яка виникає під час детонації вибухових речовин. Детонація – це процес хімічного перетворення (згорання) вибухових речовин, який супроводжується вивільненням енергії, що поширюється у вигляді ударної хвилі з високою (надзвуковою) швидкістю, завдяки чому розвивається тиск на конструкції будівель, який у твердих тілах становить декілька десятків ГПа.

Ударна хвиля є стрибком ущільнення в середовищі, що рухається з надзвуковою швидкістю (більше 350 м/с для атмосфери). Під час атмосферного вибуху стрибок ущільнення – це невелика зона, в якій відбувається майже миттєве підвищення температури, тиску та густини повітря. Безпосередньо за фронтом ударної хвилі відбувається зниження тиску та щільності повітря, від невеликого зниження далеко від центру вибуху до майже вакууму всередині вогненної сфери. Наслідком цього зниження є зворотний хід повітря та потужний вітер вздовж поверхні зі швидкостями до 100 км/год. та більше до епіцентру. Ударна хвиля руйнує будівлі, споруди і вражає незахищених людей, а близько до епіцентру наземного чи дуже низького повітряного вибуху, породжує потужні сейсмічні коливання, здатні зруйнувати або пошкодити споруди і комунікації та травмувати людей.

Більшість будівель, крім спеціально укріплених, серйозно пошкоджуються або руйнуються під дією надлишкового тиску 21...36 кПа. Енергія розподіляється всією пройденою відстанню, через що сила впливу ударної хвилі зменшується пропорційно кубу відстані від епіцентру.

Характеристики та інтенсивність вибухового навантаження визначаються вагою і типом вибухової речовини, а також відстанню від місця детонації до будівлі або захисної споруди. Неможливо заздалегідь точно визначити вагу і тип вибухової речовини, а тому вибухові матеріали класифікують за ступенем спричиненої потенційної шкоди від детонації та за виділенням «високої» або «низької» енергії. За даними ФБР вибухові речовини «високої енергії», які ефективно перетворюють хімічні реакції в тиск вибуху, становлять менше 1% всіх вибухових матеріалів [12]. Переважна більшість вибухів характеризується низьким виділенням енергії, у яких значна частина вибухового матеріалу витрачається на дефлаграційне горіння з швидкістю поширення у кілька м/с (дозвукове згорання), яке зазвичай поширюється по конструкціях будівель через теплопровідність і менш руйнівне для будівель, ніж детонація. В таких випадках велика

частина хімічної енергії розсіюється по матеріалу конструкцій як теплова енергія, що спричиняє пожежу або пошкодження тепловим випромінюванням.

Для конкретного типу і ваги вибухового матеріалу інтенсивність вибухового навантаження залежить від відстані та орієнтації вибухової хвилі відносно простору, що захищається. Ударна хвиля характеризується майже миттєвим підвищенням тиску (P), що експоненціально затухає протягом кількох мілісекунд, після чого настає довготривала негативна фаза тиску меншої інтенсивності [4, 12]. Початкову величину тиску називають піковим тиском, а тиск повітряної хвилі, розташований нижче горизонтальної лінії часу, а саме тривала динаміка тиску повітряної хвилі, – імпульсом (рис. 1). Тому імпульс, пов'язаний з поштовхом ударної хвилі, враховує як інтенсивність тиску, так і тривалість імпульсу. Оскільки фронт ударної хвилі поширюється від джерела детонації з надзвуковою швидкістю, він розширюється в дедалі більші об'єми повітря. У випадках віддалення фронту ударної хвилі від джерела детонації, піковий (максимальний) тиск при ударі на фронтальні поверхні будівлі буде зменшуватися, а тривалість імпульсу тиску збільшуватися (рис. 1, пунктирна крива).



Рис. 1. Розподіл тиску ударної хвилі на конструкції будівлі у часі (t) при наближеному фронті ударної хвилі (суцільна крива) і при віддаленому фронті ударної хвилі (пунктирна крива)

Величина пікових тисків та імпульсів зменшується із збільшенням відстані від джерела, а результуючі моделі вибухового навантаження мають вигляд концентричних кіл із зменшеними інтенсивностями. Такий ефект аналогічний круговій брижі, яка створюється, коли предмет впав у водойму. Фронт ударної хвилі спочатку вдаряється по передніх поверхнях будівлі (фасадах, покриттях), розташованих на його шляху, відбивається, заломлюється, відбувається дифракція – хвильовий рух спостерігається в області за перешкодою, створюються зони фокусування та тіні на огорожувальних конструкціях будівлі. Такі закономірності інтенсивності вибухового навантаження є складними, оскільки хвилі охоплюють всю будівлю. Тиск, що навантажує покриття, бічні та задню частину будівлі, називається падаючим тиском, а тиск, який навантажує оболонку будівлі, яка знаходиться прямо навпроти вибуху, називається відбитим тиском. Інтенсивність пікового тиску, а також імпульс впливають на потенціал небезпеки вибухового навантаження. Для визначення величини тиску та імпульсів, які можуть навантажувати зовнішні огорожувальні конструкції будівлі відносно джерела детонації, необхідні детальні дослідження.

Наслідки вибуху для малоповерхових будівель

До малоповерхових будівель відносяться житлові будинки висотою до трьох поверхів і нежитлові будівлі висотою до 9 м [6, 15, 16]. Уразливими для таких будівель є конструкції похилих покриттів і покрівлі, які виходять з ладу як при невеликих вибухових навантаженнях і малих епіцентральных відстанях, так і при потужних вибухах і великих відстанях. Більш стійкими до вибухових навантажень є малоповерхові будівлі із залізобетонним каркасом і плоскими горищними та суміщеними покриттями із залізобетонних збірних або монолітних плит. Менш стійкими є будівлі с несучими цегляними стінами, збірними залізобетонними плитами перекриттів і похилими покриттями.

На рис. 2 показаний характер впливу вибухової хвилі, яка розширюється від осередку детонації, на малоповерхову будівлю з плоским покриттям і послідовність розвитку деформацій та руйнування її конструкцій на трьох етапах розповсюдження хвилі.

На першому етапі відбувається піковий вплив вибухової хвилі на конструкції фронтальних поверхонь будівлі (рис. 2 (1)). Розміри пошкоджень найбільші у безпосередній близькості від джерела детонації – руйнуються вікна, вітражі (рис. 3), балкони, лоджії та конструкції стін.

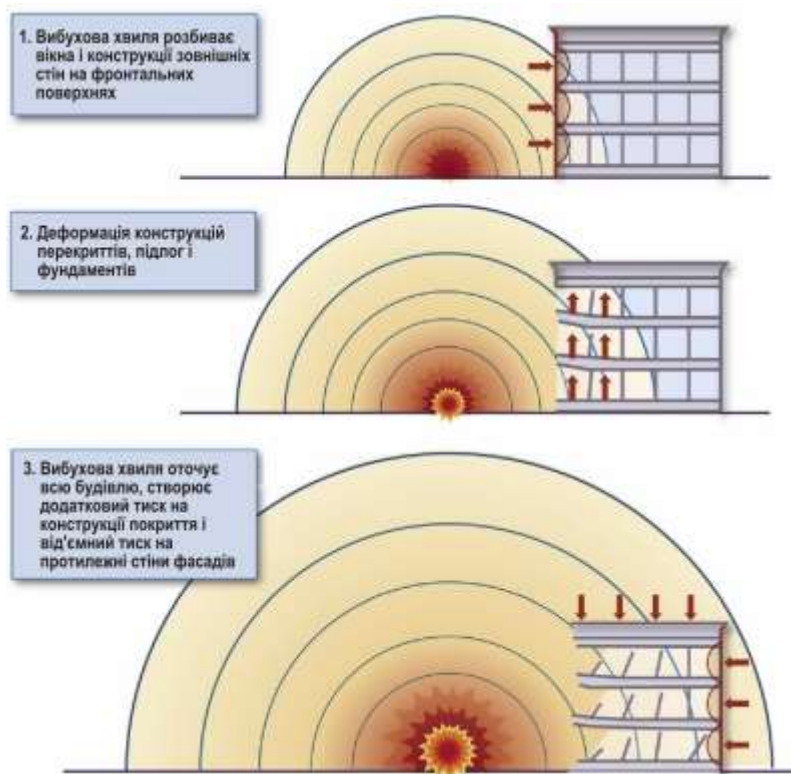


Рис. 2. Етапи розвитку деформацій та руйнування конструкцій будівлі від впливу вибухової хвилі:
1 – перший етап з піковим тиском на фронтальні поверхні; 2 – середній етап з тривалою динамікою тиску;
3 – етап охоплення вибуховою хвилею всіх конструкцій

На другому етапі, для якого характерна тривала динаміка вибухового тиску, відбувається реверсування вибухового навантаження на плити перекриттів, перерозподіл



Рис. 3. Руйнування вітражів каркасної будівлі торговельного центру в результаті російських ракетних обстрілів, м. Миколаїв, 16 травня 2023 р.

внутрішніх зусиль в горизонтальних і вертикальних конструкціях будівлі та передача горизонтальних зсувних навантажень на фундаменти (рис. 2 (2)). В результаті направлення вибухового тиску вгору можливі руйнування плит перекриттів (рис. 4).

На третьому етапі вибухова хвиля охоплює всю будівлю (рис. 2 (3)). В результаті перерозподілу зусиль в конструкціях

будівлі та виникнення непружних деформацій створюється додатковий тиск на конструкції покриття і від'ємний тиск на стіни, розташовані з протилежного до вибуху

боку, які спричиняють появу тріщин і руйнування несучих і огорожувальних конструкцій (рис. 5).

Вибухи великої інтенсивності можуть призвести до прогресуючого колапсу, який призводить до появи каскадної послідовності пошкоджень суміжних конструкцій будівлі, які є непропорційно великими по відношенню до початкового локалізованого збою. Будівлі, що знаходяться на великих відстанях від джерела детонації вибухів великої потужності, найчастіше не зазнають впливів, які призводять до прогресуючого руйнування конструкцій.



Рис. 4. Можливі руйнування плит перекриттів в результаті направлення вибухового тиску вгору



Рис. 5. Руйнування каркасно-панельної будівлі школи в результаті влучання російської ракети, м. Харків, 15 липня 2022 р.

Наслідки вибухів для багатоповерхових і висотних будівель

Характер впливу вибухової хвилі на багатоповерхові і висотні будівлі та послідовність деформацій і руйнування їх конструкцій також відповідає трьом етапам розповсюдження хвилі (рис. 2). Стійкість таких будівель суттєво залежить від несучої здатності їх конструкцій та типу будівельної і конструктивної системи і схеми [1, 15, 16].

Найменш вразливими до вибухових впливів є будівлі з монолітними залізобетонними каркасами. Прикладом є велика несуча здатність конструкцій 27-ми поверхового каркасно-монолітного житлового будинку, розташованого на вул. Валерія Лобановського, 6а у м. Києві, в який влучила російська ракета 26 лютого 2022 р. і зруйнувала 17...21 поверхи (рис. 6 (а)). За рахунок перерозподілу зусиль між вертикальними і горизонтальними конструкціями рамного каркаса будівлі прогресуючого колапсу, що призводить до появи каскадної послідовності пошкоджень суміжних конструкцій, не відбулося, несуча здатність всієї будівлі збереглася, а тому під час реконструкції верхні поверхи пошкодженої секції були розібрані (рис. 6 (б)) і будівля відновлена (рис. 6 (в)).