

УДК 624.014.2.69.059.2

## **Питання попередження можливих терористичних нападів та усунення їх наслідків стосовно споруд зі сталевих конструкцій. Частина 1**

**Шимановський О. В.**, член-кореспондент НАН України,  
заслужений діяч науки і техніки України, д-р техн. наук

Український інститут сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського, Україна

**Анотація.** Предметом розгляду виступають результати досліджень із вирішення проблеми забезпечення будівельних конструкцій, в тому числі, мостових споруд, від можливих терористичних нападів із застосуванням вибухових речовин. Розглянуто типові параметри вибухової хвилі, властивості вибухових навантажень і їхню відмінність від сейсмічних впливів, послідовність розрахунку на вибухові навантаження та прийоми штучного захисту споруд від вибуху. Визначено умови, за яких вибухові навантаження можна розглядати як рівномірно розподілені. Зазначено, що якщо кут зіткнення між ударною хвилею від вибухового заряду і конструкцією або краєм конструкційного елемента або його кінцем перевищує 45 градусів, то на споруду діють істотно знижені тиски й імпульси. У цьому сенсі вказано на те, що коли відстань до заряду перевищує половину ширини і висоти споруди або її елемента (за умови, що заряд знаходиться по центру конструкції або елемента), то навантаження на них можуть бути наближено усереднені. Представлено рівні терористичної загрози для регіонів України відповідно до постанови № 92 від 18.02.2016 р. Кабінету Міністрів України «Про затвердження Положення про єдину державну систему запобігання, реагування і припинення терористичних актів та мінімізації їх наслідків». Визначені впливи, яким повинна протистояти будівельна конструкція, та наведено методику врахування ступеня ризику під час проектування. Описані основні відмінності вибухових і ударних впливів від звичайних навантажень, які враховуються під час будівельного проектування, та зазначено, що додатковий набір динамічних конструктивних властивостей, які зазвичай не беруться до уваги, таких, зокрема, як властивості матеріалу й інерційні ефекти, залежні від швидкості впливів, слід неодмінно враховувати у розрахунку. Встановлено вірогідності навмисного нападу із застосуванням вибухівки й висвітлено принципову стратегію використання геометрії будівлі чи споруди задля послаблення дії вибуху.

**Ключові слова:** будівельні конструкції, мостові споруди, вибух, вибухова хвиля, вибухові навантаження, ступінь ризику.

### **1. Особливості вибухових навантажень та практичні прийоми захисту будівель від вибуху**

**Загальні положення.** Відомо, що навантаження від вибуху й повітряних ударних хвиль, які на своєму шляху послідовно діють на споруди та об'єкти різного призначення, можуть генеруватися найрізноманітнішими пристроями або умовами, що спрацювали чи трапилися випадково або були створені навмисно. У цьому сенсі як джерела вибухів, як правило, виступають [1]:

- ємності під тиском, заповнені інертними, горючими або легкозаймистими газами;
- миттєве займання та детонація пилю та інших частинок;
- викид (випадковий або навмисний) горючих або вибухових газів у напівзамкнутому або незамкнутому просторі;
- саморобні вибухові пристрої, в яких застосовуються сільськогосподарські добрива й дизельне паливо, порохіві заряди чи видозмінена військова зброя;
- широкий спектр комерційних і військових вибухових речовин.

Загалом, вибухи слід розглядати як «розриви бомб» у результаті протікання екзотермічних хімічних реакцій, коли енергія вивільнюється за порівняно малий проміжок часу у відносно невеликий простір таким чином, що при цьому виникає хвиля стиснення кінцевої амплітуди і довжини, яка розповсюджується від джерела вибуху. На відміну від цього, під «ідеальними» вибухами розуміють вибухи, поняття яких ґрунтується на припущенні про миттєве вивільнення енергії у певній точці. Проте в будь-якому випадку, утворені в результаті вибуху вибухові хвилі можуть поширюватися не тільки по повітрю, що зазвичай становить найбільший інтерес для проектування будівельних конструкцій, а й проходити і по поверхні землі (так званий земляний удар) або води.

Що ж стосується внутрішньої природи вибуху, то вона полягає у вивільненні накопиченої потенційної енергії, а саме це вивільнення характеризується яскравим спалахом і сильним звуком. Під час вибуху частина енергії перетворюється у теплове випромінювання (спалах), а частина виривається в повітряний простір як вибухова хвиля, а також іде в ґрунт як земляний удар, одночасно поширюючись у радіальних напрямках у вигляді ударної хвилі. Зрозуміло, щоб являтися вибуховою речовиною, матеріал повинен:

- містити речовину або суміш, які залишаються без змін за звичайних умов, однак зазнають швидких змін хімічного характеру під час активації;
- створювати реакцію, яка дає вихід газам, обсяг яких за нормального тиску стабільний, а за високих температур – набагато більший, ніж у початковому стані;
- викликати зміни ізотермічного характеру для нагрівання продуктів реакції з подальшим збільшенням їх тиску.

Вибухові навантаження найчастіше прийнято розглядати як похідні екзотермічних реакцій, які утворюються в результаті «детонацій», втім ударні хвилі у повітрі можуть виникати й у результаті розриву посудин під тиском і високої швидкості фронту полум'я під час згоряння (що характерно також для необмеженого поширення хмари вибухових парів). Коли вихідний матеріал

може протистояти надзвуковій хвилі (фронту полум'я) значної швидкості, що створює локальний високий тиск у межах вихідного матеріалу, то реакція вважається детонацією, де вся накопичена потенційна енергія вивільнюється у результаті протікання хімічної реакції. А швидкості фронту полум'я під час згоряння, нижчі за швидкість детонації, дають в результаті реакцію (вибух) незабаром після детонації, що має назву «миттєве займання», під час якого вивільнюється лише частина накопиченої потенційної енергії в процесі протікання хімічної реакції. Тому часто-густо клас вибуху у разі миттєвого займання або детонації встановлюється в залежності від виходу наявної енергії. Такий вихід енергії зазвичай відбувається у вигляді потужного удару, викликаного динамічним впливом (імпульсом), детонацією первинної вибухової речовини або ж у результаті тертя.

**Типові параметри вибухової хвилі.** На початку зазначимо, що у найбільш загальному розумінні вибухова хвиля являє собою породжений вибухом рух середовища. Вказане визначення можна перефразувати ще й у такий спосіб: вибухова хвиля – це ознака процесу, під час якого внаслідок високого тиску газів, що утворилися під час вибуху, спочатку незбурене середовище зазнає різкого стиснення і набуває великої швидкості. А стан руху передається від одного шару середовища до іншого так, що область, охоплена вибуховою хвилею, швидко розширюється, і на її фронті середовище стрибком переходить із початкового незбуреного стану в стан руху з більш високими тиском, щільністю і температурою. Причому, що характерно, ця стрибкоподібна зміна стану речовини на фронті вибухової хвилі поширюється з надзвуковою швидкістю.

Типовими параметрами вибухової хвилі є піковий тиск (амплітуда), тривалість, форма і сумарний тиск у кожен момент часу, або імпульс. Крім того, вибухові хвилі, які походять від джерел у незамкненому просторі, характеризуються ще й наступними факторами:

- мають миттєве зростання у декілька разів і експоненціальне загасання, хоча складна геометрія поширення зовнішніх і внутрішніх вибухових впливів може проявлятися й у більш складних формах хвиль;
- можуть бути масштабовані або описуватися у вигляді масштабної величини відстані від джерела вибуху до даної конструкції, у цьому разі масштабовану величину відхилення  $Z$  можна визначити наступним чином:  $Z = R / \sqrt[3]{W}$ , де  $R$  – відстань від джерела вибуху;  $W$  – вага вибухового заряду;
- можуть мати як позитивні, так і негативні фази (негативна фаза є результатом «відновлення» атмосфери поблизу джерела вибуху).

Спрощений графік залежності зміни тиску вибухової хвилі в часі у вільному просторі представлений на рис. 1.

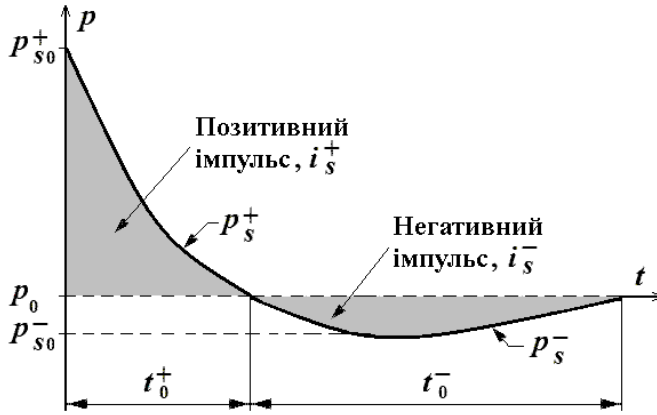


Рис. 1. Спрощений графік залежності зміни тиску вибухової хвилі в часі у вільному просторі  $p = f(t)$ :  $t_0^+$  – тривалість позитивної фази;  $t_0^-$  – тривалість негативної фази

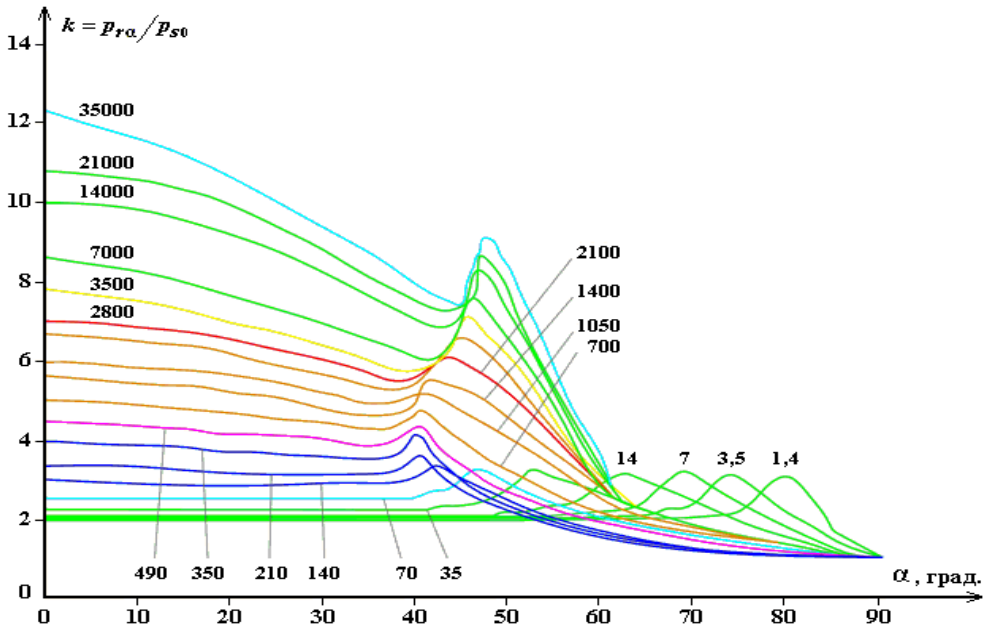


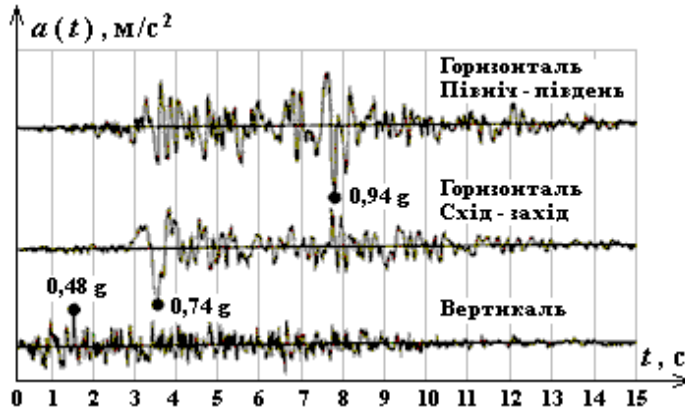
Рис. 2. Графіки залежності коефіцієнта відбитого тиску від кута відбиття у замкнутому просторі  $k = f(\alpha)$   
(цифри поруч із кривими вказують на піковий аварійний тиск  $p_{s0}$ , кПа)

Що ж стосується вибухів у замкнутому просторі або там, де має місце часткове обмеження (наприклад, міські квартали типу «каньйону», коли будинки, які стоять щільно поряд один з одним, створюють часткове обмеження), то вони

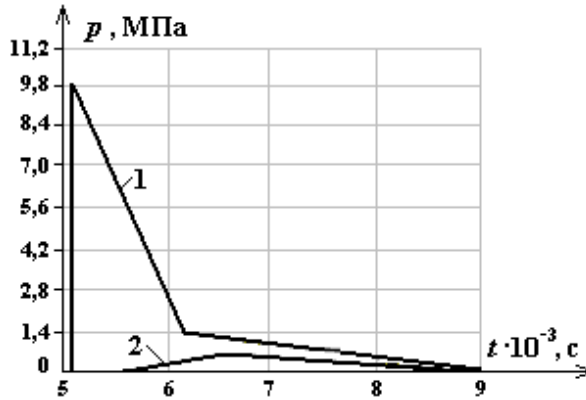
характеризуються більш складними параметрами і формами кривих. Відбиваючі поверхні будинків у таких випадках посилюють тиск і, в результаті, імпульс. На рис. 2 наведені графіки кривих функціональної залежності коефіцієнта відбитого тиску вибухової хвилі  $k$ , що являє собою відношення відбитого тиску  $p_{ra}$  до пікового аварійного тиску  $p_{s0}$ , від кута відбиття  $\alpha$  за взаємодії хвилі та споруди за різних значень пікового аварійного тиску.

**Відмінність вибухових навантажень від сейсмічних впливів.** Як вже було зазначено вище, вибухові навантаження діють протягом відносно нетривалого проміжку часу у порівнянні з сейсмічними впливами. З огляду на вказане, ефект деформування матеріалу у разі вибуху виходить на критичний шлях, що тягне за собою його обов'язкове врахування під час прогнозування роботи вузлових з'єднань будівельних конструкцій. Також зазначимо, що навантаження вибухового типу діють на споруду нерівномірно, що виражається, по-перше, в змінності амплітуд навантажень на передньому фасаді будівлі і, по-друге, у різкому зменшенні їхніх величин на її (будівлі) бокових і задньому фасадах в міру віддалення від центру вибуху. Ілюструє сказане рис. 3, на якому представлені загально відомі дані стосовно прискорень для споруди, яка знаходилася за сім кілометрів від епіцентру землетрусу 1994 року в м. Нортбрідж, штат Каліфорнія, США, і тисків на колони під час вибуху бомби в будівлі Мюррей в м. Оклахома Сіті, штат Оклахома, США. Із даного рисунку також вбачається, що землетрус тривалістю 12 секунд у м. Нортбрідж тривав приблизно у 1000 разів довше, ніж вибух бомби з 9-мілісекундним імпульсом у будівлі Мюррей.

Тепер звернемо увагу на те, що впливи від вибухових навантажень зазвичай носять локальний характер, що призводить до місцевих серйозних пошкоджень або руйнувань. І, навпаки, сейсмічні впливи проявляються у русі земляного масиву, рівномірно прилеглого до основи або фундаменту будівлі, під час якого як споруда загалом, так й усі її складові частини піддаються «струсу». Причому важливим є те, що під час таких поштовхів наявність розподіленого непружного потенціалу конструкційних елементів та їхніх вузлових з'єднань пом'якшує умови глобального руйнування споруди завдяки поступовому формуванню і накопиченню у з'єднаннях різних дефектів із подальшою їх трансформацією в специфічний аварійний механізм – так званий «шарнірний вузол», який є типовим результатом реагування переважної більшості вузлових з'єднань балок із колонами на рівні міжповерхового перекриття на дію навантажень за умови роботи матеріалу за межею пружності.



а

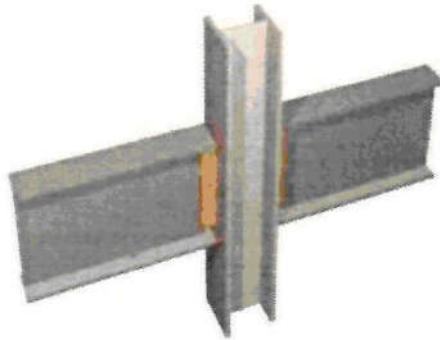


б

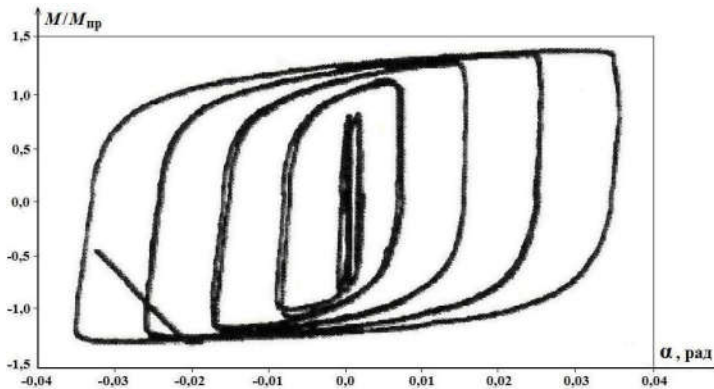
Рис. 3. Прискорення для споруди в м. Нортбрідж згідно з тривалістю події (а) і тиск на колони в результаті вибуху в будівлі Мюррей в м. Оклахома Сіті (б):  
1 – передній фасад будівлі; 2 – задній фасад будівлі

Проілюструємо викладене наступним простим прикладом. На рис. 4 зображено вузлове з'єднання сталевий балки зі сталевий колоною та відображена його пластична робота під дією згинального моменту у вигляді графіка отриманої експериментальним шляхом залежності між відношенням згинального моменту  $M$  до його граничного значення  $M_{pr}$  і кутом вигину  $\alpha$ . Аналізування графіка цієї залежності дозволяє дійти до декількох важливих висновків. Перший із них полягає в тому, що як дослідженому типу вузлового з'єднання зокрема, так і з'єднанням сталевих конструкційних елементів загалом, властиві значні запаси придатності до функціонування. А другий стосується прогнозування роботи споруд, які зазнають локалізованих пошкоджень від вибуху, із меншими пластичними властивостями вузлових з'єднань, – руйнування усього лише

обмеженого числа вузлових з'єднань із великою вірогідністю може призвести до виникнення наростаючого обвалення.



а



б

Рис. 4. Вузлове з'єднання балки з колоною (а) та графік залежності « $M/M_{гр} - \alpha$ » (б)

Незважаючи на природну відмінність вибухових навантажень від сейсмічних впливів, все ж таки деякі аспекти сейсмічного розрахунку можуть використовуватися для споруд, які піддаються впливу вибухових навантажень. Так, проведені після землетрусів дослідження з'єднань елементів конструкцій принесли істотну користь шляхом накопичення інформації про додаткові згинальні моменти й обертальний потенціал за умов подальшого застосуванні цих даних у розрахунках на вибухові або наростаючі руйнування. Проте, на жаль, у більшості досліджень не проводилось вимірювання інших вкрай важливих для оцінювання роботи непружних з'єднань в умовах інтенсивних впливів від вибухових навантажень параметрів, а саме: скручування та бокового вигину елементів та показників деформації матеріалу. До того ж згадані дослідження не брали до уваги непружну роботу, пов'язану з ослабленням наростаючого руйнування, у випадках осьового розтягування балки за взаємодії зі згинальним моментом і деформування рамних систем із статично

визначуваними з'єднаннями. Таким чином, особливі характеристики споруди у разі детального розгляду фактора сейсміки, які можуть адекватно враховуватися у випадках землетрусів, такі, наприклад, як бічна жорсткість, за умови зсуву лише однієї стіни, можуть бути гармонізовані з випадками вибухів.

**Можливість штучного захисту будівлі від вибуху.** З метою захисту будівлі або споруди від ударних хвиль із використанням способу облаштування поверхні, що відбиває вибух і обмежує певною мірою прогнозоване навантаження на конкретну споруду, можна споруджувати так звані «вибухобезпечні стіни». На жаль, ефективність такого роду стінок істотно залежить від відстані задньої частини цієї захисної стінки до споруди або будівлі. Захисна стінка може також застосовуватись для протидії повністю відбитому вибуховому навантаженню. Проте треба мати на увазі, що під впливом перевантажень стінка може стати сама по собі джерелом значних небезпечних ушкоджень. Один із найбільш типових прикладів можливої конфігурації захисної стінки наведено на рис. 5.

Як впливає з рисунка, вибухозахисна стінка висотою близько 3 м розміщена з метою захисту споруди, яка має приблизно в три рази більшу висоту. Стінка ззаду підперта земляною масою задля зменшення ефекту розкидання уламків бетону у разі її обвалення. В цьому випадку вибуховий імпульс посередині стіни зменшується приблизно на 70 % свого початкового значення без вибухозахисної стінки. Втім, можна досягти і більш істотного зменшення величини вибухового імпульсу в залежності від конфігурації і геометрії стінки.

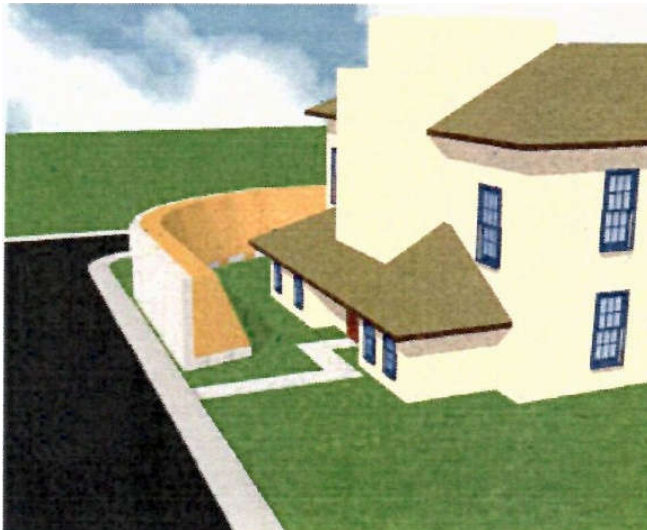


Рис. 5. Принциповий зовнішній вигляд вибухозахисної стінки



**Умови, за яких вибухові навантаження можна розглядати як рівномірно розподілені.** Відомо, що якщо кут зіткнення між ударною хвилею від вибухового заряду і конструкцією або краєм конструкційного елементу або його кінцем перевищує 45 градусів, то на споруду діють істотно знижені тиски й імпульси. Тому, коли відстань до заряду перевищує половину ширини і висоти споруди або її елемента (за умови, що заряд знаходиться по центру конструкції або елемента), то навантаження на них можуть бути наближено усереднені. А для менших відстаней навантаження зазвичай слід розглядати як нерівномірні. Ілюструє сказане рис. 6, на якому зображені можливі зміни навантаження по поверхні в залежності від її геометрії. Як приклад, на рисунку показано три моделі колон (заввишки 3,6 м і завширшки 0,3 м кожна) під навантаженням від вибуху: перша від заряду 56 кг на відстані 1,5 м; друга від заряду 450 кг на відстані 3,0 м і остання від заряду 12150 кг на відстані 9,0 м. Визначення масштабів кожного вибуху припускає, що пікові тиски повинні бути практично ідентичними за таких поєднань відстані і ваги заряду, проте геометричні дані (кути зіткнення) значно впливають на розподіл тиску по висоті колон.

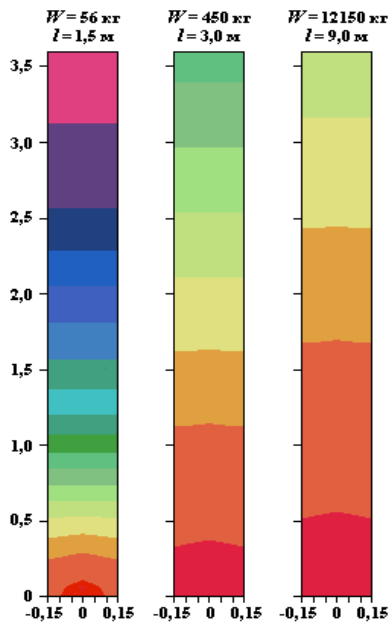


Рис. 6. Порівняння розподілу вибухового тиску (МПа) на колони, навантажені однаковим піковим тиском за різних масштабованих відстаней



Рис. 7. Моделювання розподілу вибухового тиску в умовах міської забудови

В свою чергу, на рис. 7 наведено складний стан середовища, що оточує споруди у результаті вибуху в умовах міської забудови. З цього рисунка вбачається, що численні будівлі створюють багато поверхонь для відбивання вибухової хвилі, що, насамперед, ускладнює визначення її параметрів.

Однак задля досягнення цієї мети можна використовувати спрощені методи, щоб «оцінити» або отримати «відчуття» того, як спрацює запроєктована конструкція на протидію вибухам. Існує багато рішень щодо роботи і енергії, які обмежують ступінь нееластичної реакції різних конструкційних елементів. Так звані діаграми «тиск – імпульс», або « $P - i$ », у графічному вигляді являють собою асимптотичні межі для тих випадків, коли зміна пікового тиску незначно змінює імпульс у часі для максимальної реакції, залежної від тиску. Також ця діаграма може бути застосована і для тих випадків, коли тривалість вибухового навантаження короткочасна у порівнянні з часом для максимальної реакції або частотою власних коливань споруди. Характерний приклад діаграми « $P - i$ » наведено на рис. 8.

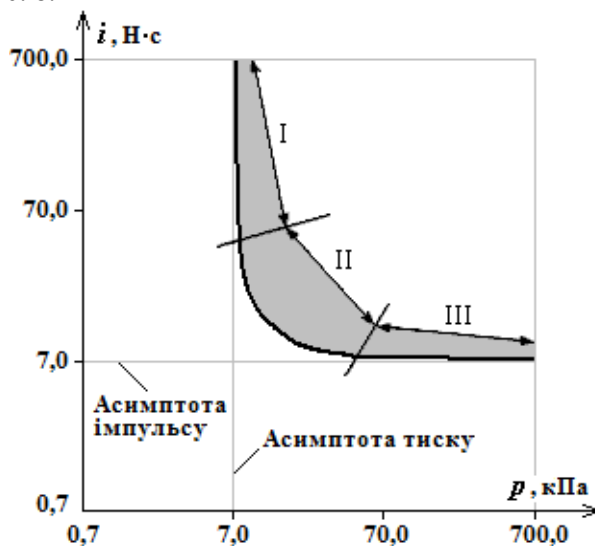


Рис. 8. Характерний приклад діаграми « $P - i$ »: I – область квазістатичного навантаження; II – область динамічного навантаження; III – область імпульсного навантаження

А на завершення звернемо увагу ще на один суттєвий аспект ударних впливів, який різко відрізняється від уже розглянутих – навантаження від удару транспортного засобу або повітряного судна. Врахування цих навантажень є достатньо складною проблемою, коли жорсткість і руйнівна сила об'єкта, який завдає удару (автомобіля чи літака), визначають навантаження, які передаються на споруду. У цьому разі для реалізації сформульованої задачі доцільно

застосовувати для розрахунку метод скінченних елементів, який надає можливість детально проаналізувати ситуацію.

## **2. Особливості забезпечення будівель та інженерних споруд у разі терористичних актів**

**Вступ.** Добре відомо, що традиційна система будівельного проектування за наявності змінних навантажень була розроблена на основі ретельного вивчення повторюваних явищ (приміром, навантажень, які виникають через регулярні проміжки часу, починаючи з помірної і закінчуючи сильним ступенем інтенсивності), які можна передбачити за допомогою статистичного підходу. На відміну від цього, випадки вибухів або нанесення навмисного удару надзвичайної сили під час терористичних нападів характеризуються як навантаження з дуже низьким ступенем ймовірності, хоча саме вони призводять до найкатастрофічніших наслідків [2].

Тісна взаємодія між навантаженнями вибухового характеру і типовими будівельними навантаженнями є одним із важливих чинників, який почав враховуватися у практичній проектній діяльності лише останнім часом. І тому в багатьох випадках наразі потрібно брати до уваги всі навантаження, як би рідко вони не зустрічалися або якими б неймовірними вони не були, а саме, навантаження, викликані нападами злочинних елементів на будівлі та інженерні споруди з огляду на наміри терористів використовувати руйнування об'єктів задля досягнення своїх цілей.

Особливе й, одночасно, першорядне значення все вказане має для України у зв'язку з воєнними діями на сході країни та пов'язаними з цими діями можливостями терористичних загроз чи атак не лише у східних регіонах, а й в інших областях країни. Через це Служба безпеки України відповідно до постанови № 92 від 18.02.2016 Кабінету Міністрів України «Про затвердження Положення про єдину державну систему запобігання, реагування і припинення терористичних актів та мінімізації їх наслідків» визначила чотири рівні терористичної загрози для регіонів України, в тому числі:

— найвищий «червоний» рівень отримали Донецька і Луганська області та анексована Росією Автономна Республіка Крим, а сам він означає реальну загрозу й призначається у разі вчинення терористичного акту;

— «жовтий» рівень одержали Запорізька, Миколаївська, Одеська, Сумська, Харківська, Херсонська і Чернігівська області, а сам він свідчить про ймовірну загрозу й встановлюється за наявності підтвердженої інформації про підготовку до вчинення терористичного акту;

— «синій» рівень отримали Дніпропетровська, Закарпатська, Рівненська, Хмельницька, Черкаська, Чернівецька, Київська області та м. Київ, а сам він

вказує на потенційну загрозу й призначається за наявності інформації, що потребує підтвердження, про підготовку до вчинення терористичного акту;

— «сірий» рівень одержали Вінницька, Волинська, Житомирська, Івано-Франківська, Кіровоградська, Львівська, Полтавська і Тернопільська області, а сам він означає можливу загрозу й встановлюється за наявності факторів (умов), що сприяють вчиненню терористичного акту.

У цьому сенсі є дуже актуальним завчасне розпізнавання надзвичайних ситуацій та забезпечення об'єктів можливих терористичних посягань, до яких найчастіше за все належать об'єкти зі стратегічним, життєво важливим значенням (державні об'єкти, об'єкти підвищеної небезпеки, об'єкти єдиної транспортної інфраструктури, особливо важливі об'єкти електроенергетики, місця масового перебування людей тощо) та прийняття відповідних випереджувальних заходів для забезпечення роботи їх основних несних будівельних систем і конструкційних елементів, достатніх для протидії розвитку таких ситуацій.

А зараз, спираючись на попередні міркування, перейдемо до розгляду найбільш важливих складових загальної проблеми виявлення й усунення причин і умов, що сприяють вчиненню терористичних актів, які мають суттєве значення для запобігання, реагування, припинення та мінімізації наслідків можливих терористичних нападів.

**Основні відмінності вибухових і ударних впливів від звичайних навантажень, які враховуються під час будівельного проектування.** Вибухові навантаження і навантаження від ударної хвилі мають досить складний перехідний характер і враховуються, як правило, у динамічній постановці у вигляді короткочасного впливу повітряної хвилі, або у вигляді контактних впливів, а також вібрації під час передачі енергії. Це перехідне навантаження додається виключно протягом конкретного і зазвичай дуже стислого періоду часу, як-от у разі навантаження від ударної хвилі час її дії не перевищує однієї десятої частки секунди. Останнє означає, що додатковий набір динамічних конструктивних властивостей, які зазвичай не беруться до уваги, таких, зокрема, як властивості матеріалу й інерційні ефекти, залежні від швидкості впливів, слід неодмінно враховувати.

Розрахунок на протидію вибуху, удару або інших особливих видів навантажень часто-густо повинен проводитись у контексті безпеки експлуатації, а не у плані зручності експлуатації або життєвого циклу споруди. Критерії експлуатаційних якостей окремих особливо відповідальних об'єктів можуть відігравати важливу роль у визначенні зручності експлуатації і повторного використання, проте більшість громадських підприємств та інженерних споруд не вимагають забезпечення такого рівня безпеки. Споруди, запроєктовані для протидії підривному і ударним впливам, допускають об'єднання всіх своїх можливостей опірності, як за лінійними, так і за нелінійними параметрами (пружними й

непружними) місцевому сприйняттю ушкоджень із таким розрахунком, щоб не порушувалась цілісність усєї конструкції. Втім, руйнування місцевого характеру не тільки можуть, а й повинні враховуватися у проектуванні в зв'язку з істотною невизначеністю, властивою таким екстраординарним навантаженням.

Цілком зрозуміло, що вибухова хвиля істотно відрізняється від усіх інших видів навантажень, які викликаються надзвичайними природними явищами, такими як землетруси або ураганні вітри. Вказані види навантажень призводять до пошкодження, яке сприймається лише небагатьма конструктивними механізмами, тим не менш впливають вони «глобально», так що вся конструктивна система працює на протидію таким навантаженням. На відміну від зазначеного, вибухова хвиля запускає в хід безліч конструктивних механізмів, що реагують на навантаження, з огляду на особливі просторові й часові зміни за силою й тривалістю впливу. У цьому сенсі особливо важливим є те, що основною метою протидії вибуху є захист людей. І саме через це потрібно мати уявлення про звичайні механізми, які проявляються в умовах вибуху, задля підготовки такого проекту об'єкта, який зможе мінімізувати вплив таких механізмів. Також необхідно брати до уваги важливість виходу живих та евакуації поранених після вибуху. Звичайно, неможливо повністю запобігти нещасним випадкам в умовах вибуху, проте можна багато чого зробити для мінімізації пошкоджень і руйнувань. Причому цю мінімізацію значно легше реалізувати, якщо мати на увазі, що нещасні випадки під час вибуху відбуваються, як правило, внаслідок:

- потрапляння в людей уламків, що розлітаються, зовнішніх і внутрішніх стін, віконного скла тощо;
- безпосереднього впливу вибухової хвилі на людей, наслідком чого є падіння чи натикання людей з різною швидкістю на тверді поверхні, закріплені й незакріплені предмети або інших людей (довідково: удар людини головою об тверду поверхню зі швидкістю близько 7 м/сек призводить до фатального результату);
- удару людини об поверхню землі, якщо її викинуто з нижніх і особливо з верхніх поверхів будівлі.

**Впливи, яким має протистояти будівельна конструкція.** Ударні хвилі у повітрі характеризуються експоненціальним загасанням у міру віддалення від центру вибуху. Крім того, за умов зустрічі з перешкодою на своєму шляху ударні хвилі «відбивають» амплітуди багато разів за своїм обсягом «атмосферного повітря». Це відбивання є функцією потужності повітряного удару, а також кута  $\alpha$  нахилу фронту ударної хвилі по відношенню до споруди. Коли конструкція піддається впливу ударної або вибухової хвилі, то вона реагує на це декількома способами залежно від потужності вибуху (функції відстані від центра вибуху, розміру й розташування конструкції по відношенню до центра

вибуху), а також від часу впливу хвилі. Вказане представлено на рис. 9, де зображена схема дії вибухової хвилі та її вплив на споруду.

Також цілком очевидно, що тривалість типового імпульсу вибуху вкладається у дуже невеликий проміжок часу порівняно з часом експлуатації будівельної конструкції. Ба більше, навантаження від вибуху мають доволі незначний вплив на сукупні бічні зусилля за умов протидії їм усіх систем будівлі. Проте частоти коливань окремих конструкційних елементів часто знаходяться в діапазоні коливань ударної хвилі, й саме через це в таких елементах можуть трапитися серйозні пошкодження. Природно, якщо вказана ситуація має місце, то це з великою вірогідністю призводить до нестійкості усєї конструкції.

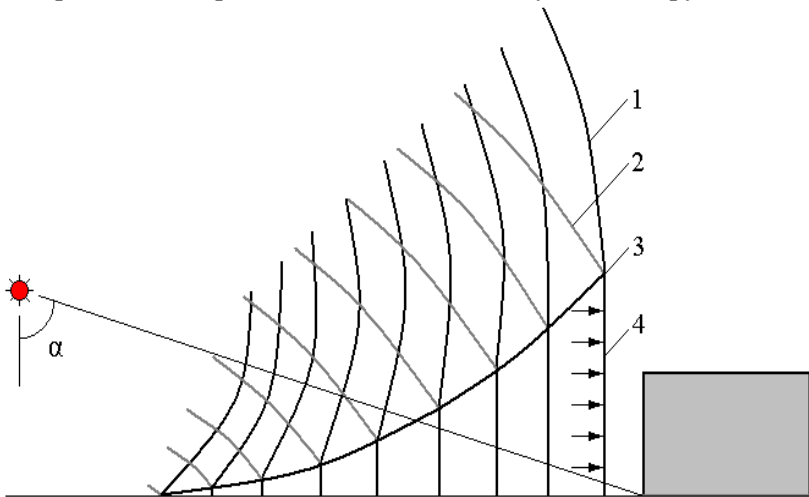


Рис. 9. Принципова схема впливу вибуху в повітрі на споруду:

- 1 – падаюча ударна хвиля; 2 – відбита ударна хвиля; 3 – шлях потрійної точки;  
4 – фронт головної ударної хвилі; ☼ – центр вибуху

Що ж стосується реакції конструкції на вплив вибухової хвилі, то вона може реагувати локально шляхом струсу, зміщення або стирання свого матеріалу. Це явище історично отримало назву «бризантної дії (роздроблення)», або ефекту впливу дуже високого тиску від вибуху. А на ділянці меншого і більш рівномірного тиску конструкція реагує, як правило, традиційним чином, тобто її деформації обумовлюються параметрами вигину або опорного зсуву. У цьому разі пластичність конструкції має дуже важливе значення через те, що під час деформування її елементів енергія вибуху гаситься до початку обвалення або падіння конструкції. Характерний приклад такої деформації представлений на рис. 10, на якому зображена значна пластична деформація сталевих елементів, що спостерігалася під час реального вибуху.

І тому, одними з головних цілей розрахунку й проектування з метою протистояння вибуховим і ударним впливам є, по-перше, запобігання ушкод-

женню або руйнуванню конструктивної системи та забезпечення її цілісності й надійності з використанням пластичної роботи споруди. Причому, ця цілісність повинна зберігатися навіть після локального виходу з ладу основних конструкційних елементів, перешкоджаючи, таким чином, непропорційному чи наростаючому обваленню споруди. А друге взаємопов'язане (а може, навіть і більш важливе!) завдання, полягає у зменшенні кількості або усуненні уламків, які після руйнування є головним чинником нещасних і смертельних випадків під час вибуху.



Рис. 10. Деформація колони від впливу вибухової хвилі

У сенсі забезпечення конструктивної цілісності споруди наведемо ще й такі міркування. Якщо навантаження від вибуху досить велике для збереження несної здатності у разі вертикального навантаження колони або іншого опорного елемента, який сприймає вертикальне навантаження, то післявибухове розвинення великих розтягувальних зусиль у балках навряд чи буде мати місце внаслідок значних прогинів, викликаних утворенням так званого «подвійного прогону» – себто подвійним збільшенням відстані між колонами через руйнування якоїсь однієї колони. Останнє пов'язане з тим, що у таких випадках балки починають працювати не за балковими схемами (іншими словами, протидіючи вертикальним навантаженням своїм вигином), а, скоріше, як тяжі,

що сприймають вертикальні навантаження подібно до провисаючої нитки за умов роботи за межею пружності від згинальних моментів та осьових зусиль у балках і вузлах їх кріплення до колон.

До речі, до виникнення згаданого подвійного прогону, крім безпосереднього впливу ударної хвилі, може призвести й руйнування поверхів (перекриттів) внаслідок поширення вибухових тисків ззовні споруди крізь її пошкоджені фасади (облицювання та скління). А самі вибухи стають чинником появи первинних уламків (від бомби або фрагментів автомобіля) або вторинного сміття, яке складається з продуктів вибуху або уламків зруйнованої споруди у межах джерела вибуху. Тому конче потрібно брати до уваги можливість формування цих уламків під час проектування конструкцій із метою зменшення небезпеки для населення і запобігання втраті ключових конструкційних елементів.

А з приводу особливостей роботи цих ключових елементів під час вибуху відзначимо наступне. Коли конструкція сталевго каркаса піддається удару повітряної хвилі або іншим потужним місцевим впливам, то у більшості випадків відбувається, по-перше, кручення балок, викликане бічним закріпленням їх верхніх полиць. Це кручення відбувається в результаті безпосереднього кріплення до плоского елемента жорсткості за умов приєднання до плити перекриття (у разі допущення, що плита перекриття залишається прикріпленою до полиці балки). Поза тим, цьому крученню сприяє бічний вигин балок, які утворюють із колонами рамні системи. Зауважимо, що такі випадки роботи не є типовими у практиці стандартного проектування балок та їх вузлових з'єднань із колонами, оскільки за таких обставин сили тяжіння, які діють на прилеглі системи перекриттів, здатні здійснювати несприятливий вплив на підтримуючі їх балки й з'єднання, що піддаються крученню. По-друге, в колонах сталевго каркаса спостерігаються такі ефекти: скручування, місцеві деформації стінок і полиць балки, а також інтенсивні динамічні зміщення у їхніх основах та зонах опирання перекриття.

**Ступінь врахування рівня ризику під час проектування.** Вимоги проектування споруд з урахуванням їх протистояння вибуховому, ударному й наростаючому руйнуванню включають кількісне визначення рівнів ризику та відповідних критеріїв експлуатаційних характеристик. До того ж відповідальні споруди, як мінімум, підпадають під вимоги послаблення наростаючих руйнувань; також для них заздалегідь можуть бути передбачені розміри загроз аварійних ситуацій під час вибухів.

Тому в згаданих випадках проектування і розрахунок будівель потрібно виконувати з використанням способів оцінювання загроз, коли кількісно встановлюється ймовірність загроз вибуху або удару. Звичайно це визначення повинно проводитися експертами у галузі безпеки, які володіють інформацією



про загрози локального й національного масштабу та уразливість споруд, і залучаються до роботи з метою формулювання, подальшого оброблення та необхідного деталізування такої інформації. Зокрема, такий експерт може підготувати об'єктивну оцінку щодо можливості доступу транспортних засобів і персоналу в зону об'єкта, діяльності отримання/відправлення/доставляння і постачання різноманітних вантажів, візуально з'ясувати можливість балістичної атаки, а також проаналізувати робочі процедури забезпечення безпеки задля виявлення і кількісного визначення загроз загоряння, удару або балістичного вибуху. У цьому разі лише треба мати на увазі, що оцінювання загроз і рівня ризику пересічно проводиться покроково, приблизно у такій послідовності:

1. Визначення, які саме види, типи активів (люди, обладнання чи інформація) та в якій кількості підлягають захисту, а також окреслення рівнів критичності наслідків потенційної загрози для сталої роботи.
2. Визначення агресивних чинників, що полягає в оцінюванні, який саме тип об'єкта потрібно захищати з огляду на його національну або місцеву історичну, політичну або естетичну цінність, а також чітку видимість, доступність, впізнаваність чи цінність для агресора (з урахуванням, «чого він, власне, хоче»: історії нападів, засобу стримування).
3. Визначення тактики та рівнів серйозності загрози, а саме: оцінювання відповідності тактики потенційних агресорів і визначення рівнів серйозності загрози.
4. Визначення комбінацій вищезазначених чинників для розрахунку основної загрози.
5. Визначення рівня захисту, який пов'язаний з вартістю активів і розрахунковою основною загрозою.
6. Визначення рівня ризику та допустимості такого ризику з урахуванням деталізованих параметрів тактики та захисту.
7. Встановлення обмежень для користувача в частині вартості, наявного операційного контролю, розташування прилеглих об'єктів, архітектурних та естетичних вимог.

З викладеного випливає, що проектування будівлі й будівельного майданчика повинно здійснюватись комплексно з урахуванням експлуатаційної безпеки, максимальних відстаней і зворотних переміщень транспортних засобів. Також необхідно враховувати ступінь захисту у функціональній схемі, приділяючи особливу увагу розгляду загроз високого рівня й уразливості прилеглих споруд.

**Визначення вірогідності навмисного нападу із застосуванням вибухівки.** Зазвичай навмисні напади розподіляються на два типи: з використанням автомобілю з бомбою або за посередництва терориста, який несе вибухівку на

собі. Причому з урахуванням набутого останнім часом досвіду численних терористичних атак можна стверджувати, що масштаби нападів першого типу між собою сильно відрізняються – від застосування декількох десятків кілограмів вибухівки аж до приблизно 10 тон вибухового матеріалу. У другому ж випадку, з приводу ваги вибухівки, яку проносить терорист, зазначимо, що вона, залежно від фізичних можливостей людини, як правило, не перевищує 50 кілограмів, але зазвичай її вага обмежується 25 кілограмами. Тож з метою візуалізації наслідків цих нападів на рис. 11 наведено декілька графіків залежності між вагою вибухівки в закладених в автомобілях різних типах бомб та їх відстанями від об'єкта за характерних значень тиску, які вказані на кривих.

Цілком зрозуміло, що випадки нападів із бомбами на транспортних засобах обмежуються умовами їхнього можливого проривання до наміченого пункту. І саме тому необхідно заздалегідь припускати різноманітні варіанти несанкціонованого проникнення на бажану позицію неконтрольованого транспортного засобу. Тільки в цьому разі потрібно пам'ятати, що терористи не дотримуються жодних правил дорожнього руху, а також не звертають увагу на наявність тротуарів і газонів. Через це для забезпечення цілісності границі уздовж усього периметру об'єкта доцільно проводити облаштування захисних огорож і спеціальних бар'єрів.

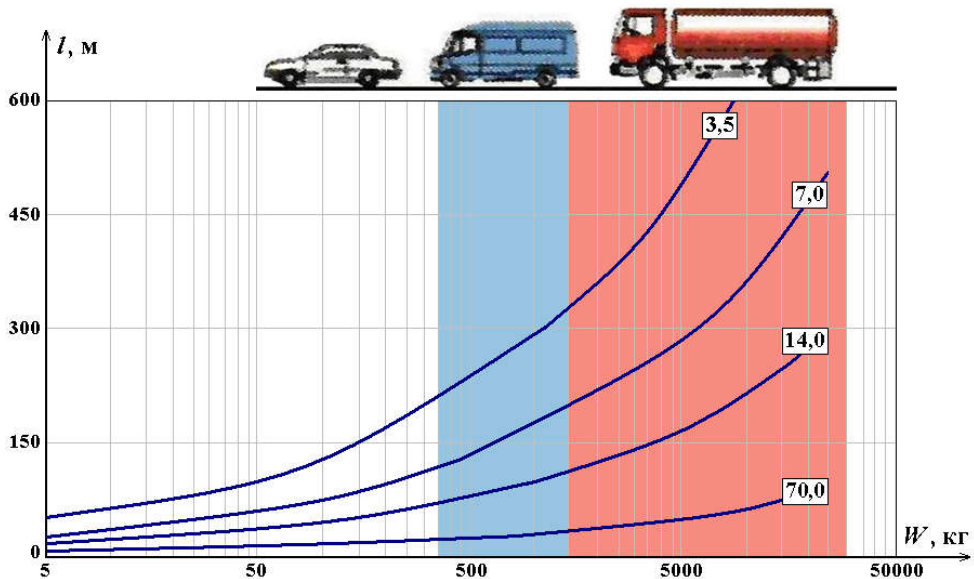


Рис. 11. Графіки залежності між вагою вибухівки у закладених в автомобілях різних типах бомб та їх відстанями від об'єкта за різних значень тиску (величина тиску вказана в кПа)

Що ж стосується ймовірності вчинення будь-якого з таких нападів і визначення зони застосування вибухівки, то вони пов'язані очевидною функціональною залежністю з доступністю об'єкта та його максимальною близькістю до епіцентру вибуху. На відміну від цього, на жаль, житлові будівлі також можуть наражатися на небезпеку, просто значною мірою з огляду на їхню близькість до основної мети нападу: наявний досвід свідчить, що найбільші бомбові удари викликали значні «побічні пошкодження» у довколишніх будівлях.

У розвиток наведеного наголосимо ще й на тому, що максимізація відстані істотно зменшує ефект від вибуху конкретної ваги заряду, оскільки вибухові тиски значно зменшуються у разі збільшення відстані. Проте зрозумілим є й те, що хоча дотримання належної відстані є ефективним засобом зменшення ризику від вибухових впливів, однак саме по собі це не є достатнім. Остання теза пояснюється тим, що ранцеві заряди, впливи військової техніки та невизначеність під час небезпеки можуть призвести до наперед не очікуваних рівнів навантаження від вибуху на споруди. Тому під час розрахунку й проектування сталевих каркасів необхідно застосовувати низку заходів захисту розпорядчого характеру, в тому числі: прогнозувати можливість видалення окремих конструкційних елементів, проводити деталізацію елементів та їхніх вузлових з'єднань для забезпечення пластичної роботи, забезпечувати цілісність і запас міцності як глобально, так і локально.

**Експлуатаційні й «неконструктивні» заходи безпеки.** Захист будівель та інженерних споруд краще за все проводити в термінах «шарів захисту», «кільць захисту» або «захисту в глибину», метою якого є виявлення й ослаблення небезпек на якомога більш віддаленому зовнішньому кільці безпеки. Втім, усі небезпеки не завжди можна (а точніше, майже ніколи не можна!) зупинити на одному і тому самому шарі або кільці, тому застосування підходу з пошаровим і об'єднаним забезпеченням безпеки є надзвичайно важливим. Ефективний пошаровий захист передбачає використання усіх захисних ресурсів, що включають:

- постійне відстеження і своєчасне оповіщення про місцеві та національні джерела загроз та повідомлення інформації секретного характеру;
- здійснення постійного нагляду за прилеглою територією;
- ефективне використання майна на прилеглий території, місцях доступу, сторонніх і транспортних шляхах;
- ефективне використання адміністративного контролю, ідентифікації транспортних засобів і персоналу;
- постійне проведення інспекцій транспортних засобів і персоналу, а також техніки разом із ефективними протоколами їх використання;

- створення фізичних бар'єрів для перешкоджання пересуванню транспортних засобів і персоналу;
- застосування сучасних методів і технічних засобів контролю доступу;
- використання захисних пристосувань під час проектування та зведення елементів будівель;
- ефективного залучення до роботи експертів із захисту споруд у поєднанні з використанням захисних заходів.

Як вбачається з наведеного переліку, експлуатаційні обмеження і проведення контролю є важливими складовими забезпечення безпеки як території зокрема, так і захисної системи будівлі й території в цілому. Причому безперечним є те, що облаштування уздовж периметру бар'єрів проти проникнення транспортних засобів допомагає збільшити відстань до вибуху. На рис. 12 показано типові підходи, що найчастіше застосовуються для захисту периметра території, які не «ображають» смак із точки зору архітектури.

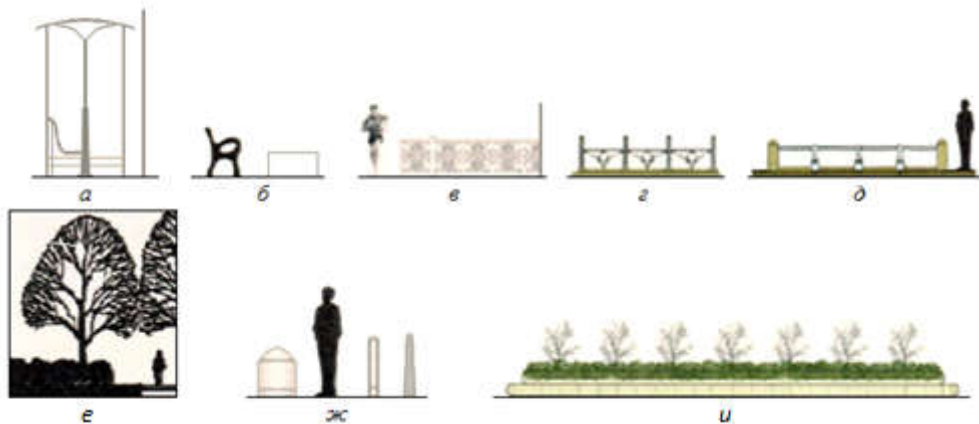


Рис. 12. Найбільш поширені типи бар'єрів проти проникнення транспортних засобів:

- а* – елементи важкого вуличного обладнання; *б* – посадкові місця вуличних кав'ярень;
- в* – декоративні стіни; *г* – декоративні огорожі; *д* – огорожі та лавки;
- е* – стіни з рослин і зелених насаджень; *ж* – огорожі та тумби; *и* – зелені насадження

Додатково до рекомендацій щодо облаштування території та встановлення обмежень, розподіл внутрішнього простору будівлі варто проектувати таким чином, щоб мінімізувати для людей небезпеку наслідків вибуху та уламків, які розлітаються. Скажімо, приміщення уздовж периметру, які мають невеликі розміри та площі, можуть бути переплановані під склад або приміщення, де заборонено постійне перебування людей. Дуже важливе значення має проведення контролю доступу біля входів у будівлю, яке, безсумнівно, не тільки запобігає проникненню всередину осіб, які несуть вибухівку, а й усуває

необхідність посилення внутрішніх конструкційних елементів. Також у багато разів обмежує небезпеку вибуху в головній будівлі ще й проведення перевірки предметів, пошти та пакетів, які доставляються до неї, яку конче потрібно проводити поза стінами будівлі або навіть поза прилеглою територією, в окремому спеціально обладнаному приміщенні.

Стосовно ж прийнятних експлуатаційних якостей конструкції в умовах вибухових, ударних чи наростаючих руйнувань зауважимо, що ці якості пов'язані з послабленням безпеки й запобіганням нещасним випадкам. Зазвичай, оскільки допускається непружна робота елементів, які піддаються впливу цих навантажень, вони працюють в умовах контрольованих деформацій, тобто, вказуються деякі допустимі переміщення, повороти або пластичність (на основі мінімізації уламків) для кожного типу конструкційного елемента в розрахунку на вибухові навантаження. А для прогресуючих руйнувань необхідно додатково обумовлювати межі деформацій задля забезпечення існування деяких залишкових можливостей.

**Відмінності проектування з урахуванням ослаблення вибуху від проектування опору наростаючому руйнуванню.** Проектування з урахуванням ослаблення вибуху або розрахунку сталевій конструкції на опір вибуховим впливам передбачає оцінювання окремих будівельних елементів або всієї системи загалом в залежності від розподілу вибухового навантаження. Тому в цьому випадку завданням проекту є зменшення або усунення уламків у результаті утворення захисної «оболонки» для обладнання і людей всередині або запобігання руйнуванню основних будівельних елементів шляхом забезпечення місцевого опору вибуховим навантаженням.

На відміну від цього, розрахунок на опір наростаючому руйнуванню є, у певному сенсі, незалежним від загрози, оскільки в такій ситуації концепція проектування полягає у досягненні достатнього запасу міцності будівельної системи з метою запобігання розвитку руйнувань. Разом із тим очікується, що руйнування місцевого характеру можуть траплятися, через що під час розрахунку видаляється єдиний вертикальний конструкційний елемент (зазвичай колона), а до всієї конструкції висувається вимога щодо забезпечення її придатності до функціонування у вигляді «мостового перекриття» над видаленим елементом. З огляду на вказане значна частина розрахунків на наростаючі руйнування стосується «перерозподілу» запасу міцності по всій конструкції таким чином, щоб ефект «мостового перекриття» мав змогу виявитися у будь-якому місці, де потенційно може бути втрачена колона.

**Забезпечення живучості конструктивних систем за умов вибухових навантажень.** Цілком зрозуміло, що будь-яка вибухостійка споруда має бути запроєктована у такий спосіб, щоб була забезпечена її живучість, необхідна для протистояння прикладеним вибуховим навантаженням як локально на рівні

елемента і вузлового з'єднання, так і глобально – на рівні усїєї конструктивної системи. Іншими словами, міцна та стійка конструкція з достатнім запасом міцності має працювати найкращим чином під впливом потужних перехідних навантажень, викликаних вибухом. Саме через це існує думка, що залізобетон є оптимальним матеріалом для протистояння вибуху завдяки своїм масивним, монолітним якостям. І дійсно, детально опрацьована й побудована належним чином споруда з монолітного залізобетону з характерною для нього масою має хороші експлуатаційні можливості. Однак відомо також і те, що бетонні конструкції з конструкційними розривами та зонами нестійкості (збірні попередньо напружені балки, ригелі, системи перекриттів) за деякими напрямками прикладення навантаження часто поведуться вкрай незадовільно під дією вибухових навантажень.

На противагу цьому щодо сталевих конструкцій відомо, що вони мають значну пластичність у випадках належного проектування та виконання вузлових з'єднань, що дозволяє їм бути цілком ефективними у протистоянні ефекту вибуху. Більше того, ці конструкції страждають скоріше від нестачі основної інформації стосовно навантажень від вибухів, ніж від прямих фізичних впливів вибухових хвиль.

Стосовно ж матеріалів, які використовуються для систем перекриттів, облицювання зовнішніх стін та їх вузлових з'єднань зі сталевим каркасом, відомо, що вони мають менший спротив вибуховим впливам. Отже каркас може встояти, проте люди, які знаходяться а ньому, та внутрішній вміст будівлі можуть постраждати. Тому незаперечним є той факт, що належна деталізація розміщення віконних прорізів, заповнення каркаса і перекриттів, солідна вага і наявність систем опору бічним навантаженням і, як правило, пластична робота конструктивної системи визначають ефективність будь-якого будівельного проекту та його стійкість до вибухових впливів.

З викладеного випливає, що проект протидії вибухам та іншим екстремальним навантаженням повинен бути збалансованим у розумінні того, що посилення одного ключового конструкційного компонента викликає перерозподіл навантажень на прилеглі опорні або інші несні елементи, які можуть бути, а можуть і не бути заздалегідь розраховані на опір цим додатковим навантаженням. Прикладом цього може слугувати оболонка або система облицювання ненесної стіни, які модернізуються з метою протидії вибуху або, принаймні, забезпечення протистояння інтенсивним вибуховим навантаженням. Ця ненесна стіна буде передавати більш інтенсивні вибухові навантаження (більший тиск із більшою тривалістю) на перекриття і колонний каркас на відміну від не підсиленої системи. І тому такі навантаження необхідно брати до уваги задля запобігання виникненню «слабкої ланки» в існуючій конструктивній системі.

**Принципова стратегія використання геометрії будівлі чи споруди для послаблення дії вибуху.** Безсумнівно, що форма будівлі значно впливає на обсяг загальних руйнувань усієї споруди від вибухових навантажень. У нових будівлях правильне та рівномірне розташування конструкційних елементів (балки, колони, стіни тощо) є істотним чинником посилення здатності конструкції витримувати наростаючі руйнування, викликані вибухом. До того ж рівномірність проекту дозволяє забезпечити міцність та цілісність, більший запас міцності й більш легкий перерозподіл навантаження у разі виходу елемента з ладу. На відміну від цього, наявність нерівномірностей, таких як вхідні кути й нависаючі елементи, сприяє уловлюванню ударної хвилі з подальшим посиленням навантаження від вибуху. Загалом, для зовнішньої частини будівлі кращими є опуклі, а не увігнуті поверхні, оскільки відбиваний тиск зменшуватиметься на опуклих поверхнях порівняно з плоскими або увігнутими.

Отже, загальні рекомендації з розроблення вибухостійкого проекту споруди полягають у наступному:

- обмежувати відстані між колонами через те, що великі відстані між ними суттєво зменшують здатність конструкції компенсувати несну спроможність втрачених вертикальних елементів. Проте, одночасно слід пам'ятати, що короткі проміжки між колонами посилюють вразливість двох сусідніх колон у залежності від розміру вибухового заряду;
- використовувати для облицювання зовнішніх стін порожнисті панелі через те, що зовнішні прогони завжди є найбільш уразливими;
- вводити додаткові передавальні конструктивні системи виключно із зовнішньої сторони будівлі через те, що руйнація внутрішніх передавальних балок або колон, які їх підтримують, значно посилює завдані будівлі загальні пошкодження;
- передбачати зовнішню обробку (або облицювання) відкритих зовнішніх колон через те, що кожен сантиметр додаткового віддалення від колон закладених вручну або принесених із собою вибухових зарядів може істотно поліпшити їхню (зовнішніх колон) живучість і придатність до безвідмовної роботи;
- застосовувати часте розташування ригелів між балками через те, що таке розташування допомагає оптимізувати перерозподіл навантаження у разі виходу з ладу хоча б однієї балки;
- застосовувати перші консольні прогони від першого ряду втоплених урівень колон уздовж периметру будівлі через те, що це створює додаткову відстань до першого ряду колон; однак консольні прогони повинні проектуватися з урахуванням їх підйому вгору;

- всіляко полегшувати облицювання стін через те, що таке полегшення зменшує навантаження, які передаються на конструктивну систему;
- планувати кріплення облицювання до прогонових будов у вертикальному положенні між плитами перекриття.

**Вплив властивостей матеріалу та геометрії перерізів на опір вибуховим навантаженням.** Як вже зазначалося раніше, основна властивість матеріалу, яка сприяє успішній роботі конструкцій під час вибухових навантажень, – пластичність. Ця властивість є здатністю матеріалу або всієї конструкції реагувати на значну сталу деформацію, включаючи пластичні деформації матеріалу, до моменту розриву або досягнення нею будь-якого іншого граничного стану. Міцність і жорсткість є дуже важливими параметрами, проте маса елемента, який сприймає безпосереднє навантаження від вибуху, сприяє посиленню загальної опірності завдяки інерційному опору. Крім того, поняття маси нерозривно поєднане з таким параметром як товщина, яка у сталевих елементах і вузлових з'єднаннях сприяє загальному позитивному ефекту, забезпечуючи опір місцевому зсуву, відриву, а також місцевому викривленню. Тому з метою підвищення живучості будівлі або споруди рекомендується використовувати під час розроблення проекту так звані «сейсмичні» секції, які можуть із більшим ступенем ймовірності сприяти досягненню очікуваного рівня роботи конструкції без передчасних деформацій.

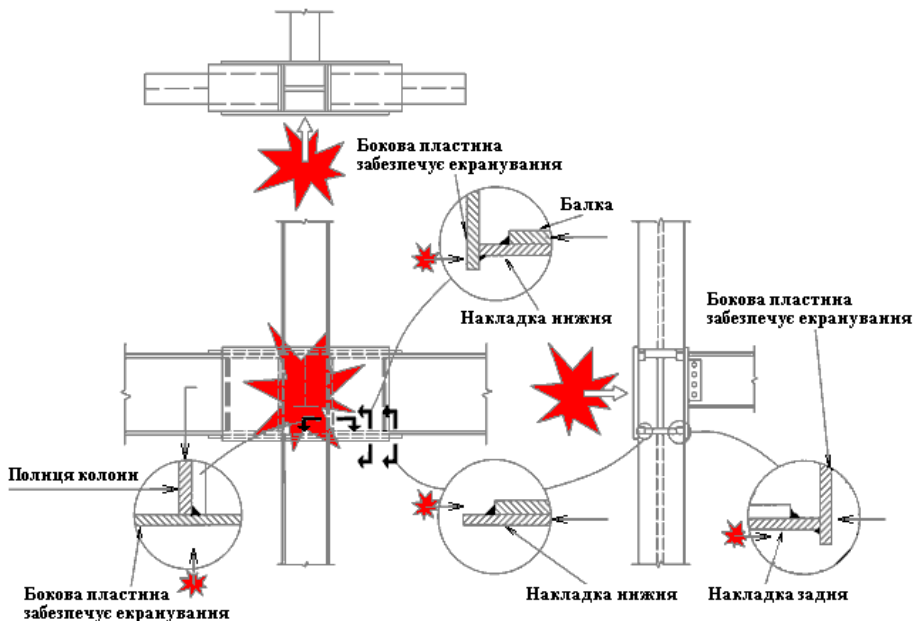


Рис. 13. Приклад сейсмичного вузлового з'єднання сталевих несних елементів, які забезпечують також захист від вибуху



Рисунок 13 показує характерне вузлове з'єднання сейсмічного типу, яке може бути використане у проектуванні на вибухобезпечність завдяки своїм потенційним можливостям щодо сприйняття пластичних деформацій.

**Особливості проектування вузлових з'єднань несних сталевих елементів.** Не викликає сумніву той факт, що для сталевих конструкцій робота усієї системи буде настільки ефективна, наскільки ефективними виявляться її з'єднувальні елементи. Оскільки вузлові з'єднання є найбільш уразливими місцями системи (особливо під дією вибухових навантажень), то дуже важливим є їхній ретельний розрахунок, належне проектування і деталізація задля забезпечення пластичної роботи.

Безсумнівним тут також є те, що якщо сталеві елементи спроектовані відповідним чином, вони можуть мати необхідну пластичність, щоб забезпечити належний опір впливу вибуху й наростаючим руйнуванням. Однак через характерні складнощі у разі створення конгруентних «однорідних» будівельних систем із серії дискретних з'єднаних один з одним елементів, які розраховуються на вибух, часто не застосовується конструктивна сталь. Внаслідок чого вузлові з'єднання являють собою важливу проблему, яка викликає найбільшу кількість питань під час проектування вибухобезпечних конструкцій через наявність широкого спектру типів з'єднань із властивими їм різноманітними конфігураціями та параметрами пластичності. В цілому, обґрунтований розрахунок вузлових з'єднань несних елементів сталевих каркасів повинен враховувати наступні вимоги:

- приймати до уваги основні конструктивні властивості з'єднань;
- застосовувати з'єднання, які відповідають положенням обертально-поворотного потенціалу для каркасів, розрахованих на особливі моменти;
- проектувати з'єднання з урахуванням розвинення у балці пластичного моменту, а також здатності балки до осьового розтягування; крім того, з'єднання повинні перевірятись на сумісність щодо деформацій;
- використовувати з'єднання, розраховані на момент вигину в обох напрямках від периметра, що дозволяє балкам працювати як консолі з одного прогону всередину від зовнішньої частини;
- приймати розміри болтових з'єднань такими, щоб модулі руйнування з меншими механізмами розсіювання енергії (скажімо, у разі зсуву блоку) не контролювали ситуацію;
- виконувати розрахунок з'єднань, які працюють лише на зсув, у такий спосіб, щоб вони дозволяли розвиватися достатнім осьовим розтягувальним зусиллям у балках;

- практикувати з'єднання на високоміцних болтах задля запобігання крихкому руйнуванню від напружень, зосереджених у зонах зварних швів;
- використовувати наплавлений метал із початковою ударною в'язкістю;
- уникати з'єднань, які мають тенденцію до концентрації пластичності на невеликих площах споруди. Через це, на відміну від випадків урахування сейсмічних впливів у проектуванні, краще за все розподіляти пластичність по конструкційних елементах для того, щоб звести до мінімуму концентрацію напружень.

**Вплив облицювання і перекриттів на передавання навантажень.** Системи облицювання приймають на себе принаймні частину загального вибухового навантаження і розподіляють його через свої реакції на несні стіни, балки і колони. Причому, що зрозуміло, навантаження передається на опорні елементи лише тоді, коли системи облицювання протидіють вибуховому навантаженню, тому що після руйнування ніяке додаткове навантаження вже не передається. Загалом, всі облицювальні системи, які реагують на вибухові навантаження, повинні проектуватися спільно з несним каркасом або конструкцією. У цьому сенсі підкреслимо, що застосування надмірно жорсткого або потужного облицювання може фактично завдати шкоди усій роботі конструктивної системи. Також необхідно відзначити, що навіть найлегші облицювальні системи у змозі витримувати навантаження від звичайних вибухових речовин достатньо довго для того, щоб забезпечити повний розвиток відбитих тисків.

Що ж стосується міжповерхових перекриттів, зокрема розташованих у прогонах уздовж периметру споруди, вони можуть піддаватися впливу вибуху, який проривається у внутрішній простір крізь зруйноване облицювання. У разі кращого розвитку подій вказані системи перекриття відповідатимуть на вибух і реактивні навантаження, впливаючи, в свою чергу, на несні балки або прогони. А в найгіршому варіанті ці міжповерхові балочні системи й крокви піддадуться руйнуванню, що позбавить несні балки, прогони або колони бічної опори, тим самим не тільки збільшуючи вільні довжини цих елементів, а й провокуючи їхнє руйнування й обвалення, пов'язане з набутою нестабільністю.

**Найтипівіші помилки проектних і технічних рішень.** Результати виконаного останнім часом аналізу багатьох проектних рішень будівель і споруд (в тому числі, відповідальних) дав змогу сформулювати перелік найбільш типових помилок у конструктивних підходах, які не слід застосовувати у реальному проектуванні у сенсі забезпечення потрібного рівня безпеки при вибухових навантаженнях. А рекомендації щодо попередження цих помилок пов'язані з невикористанням під час розроблення проектів:

- деталей вузлових з'єднань, робота яких потенційно може відбуватися в режимах непластичного або крихкого руйнування;

- передавальних систем уздовж периметру будівлі, які не мають достатнього запасу міцності;
- колон або бічних елементів, розташованих із великими інтервалами;
- фасадних або облицювальних систем, які «збирають» вибухове навантаження внаслідок увігнутої форми або кутів, більших ніж 180°;
- потужних облицювальних і слабких рамних систем, де руйнування облицювального покриття не відбувається до руйнування каркаса;
- слабких вузлових з'єднань колон внапуск у зоні нижніх рівнів.

## **Література**

- [1] Шимановський О. В. Особливості вибухових навантажень та практичні прийоми захисту будівель від вибуху / О. В. Шимановський // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2019. – № 4. – С. 28–32.
- [2] Шимановський О. В. Особливості убезпечення будівель та інженерних споруд при терористичних нападах / О. В. Шимановський // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2018. – № 4. – С. 2–11.

## **Вопросы предупреждения возможных террористических нападений и устранения их последствий в отношении сооружений из стальных конструкций.**

### **Часть 1**

**Шимановский А. В.**, член-корреспондент НАН Украины,  
заслуженный деятель науки и техники Украины, д-р техн. наук

Украинский институт стальных конструкций имени В. Н. Шимановского, Украина

**Аннотация.** Предметом рассмотрения выступают результаты исследований по решению проблемы обеспечения безопасности строительных конструкций, в том числе, мостовых сооружений от возможных террористических нападений с применением взрывчатых веществ. Рассмотрены типовые параметры взрывной волны, свойства взрывных нагрузок и их отличие от сейсмических воздействий, последовательность расчета на взрывные нагрузки и приемы искусственной защиты сооружений от взрыва. Определены условия, при которых взрывные нагрузки можно рассматривать как равномерно распределенные. Отмечено, что если угол столкновения между ударной волной от взрывного заряда и конструкцией или краем конструкционного элемента или его концом превышает 45 градусов, то на сооружение действуют существенно сниженные давления и импульсы. В этом смысле указано на то, что когда расстояние до заряда превышает половину ширины и высоты сооружения или его элемента (при условии, что заряд находится по центру конструкции или элемента), то нагрузки на них могут быть приближенно усреднены. Представлены уровни террористической угрозы для регионов Украины в соответствии с постановлением № 92 от 18.02.2016 г. Кабинета Министров Украины «Об утверждении Положения о единой государственной системе предупреждения, реагирования и прекращения террористических актов и минимизации

их последствий». Определены воздействия, которым должна противостоять строительная конструкция, и приведена методика учета степени риска при проектировании. Описаны основные отличия взрывчатых и ударных воздействий от обычных нагрузок, которые учитываются при строительном проектировании, и указано, что дополнительный набор динамических конструктивных свойств, которые обычно не учитываются, таких, в частности, как свойства материала и инерционные эффекты, зависящие от скорости воздействий, следует непременно учитывать в расчете. Установлены вероятности преднамеренного нападения с применением взрывчатки и освещена принципиальная стратегия использования геометрии здания или сооружения для ослабления действия взрыва.

**Ключевые слова:** строительные конструкции, мостовые сооружения, взрыв, взрывная волна, взрывные нагрузки, степень риска.

## **Issues of Preventing Possible Terrorist Attacks and Eliminating their Consequences in Relation to Steel Structures.**

### **Part 1**

**O. Shimanovsky**, Corresponding Member of the NASU, Honoured Worker of Science and Technology of Ukraine, Dr. Sc. (Eng.)

V. Shimanovsky Ukrainian Institute of Steel Construction, Ukraine

**Abstract.** The subject discussed is the results of studies to solve the problem of ensuring the security of constructions, including bridge structures, from probable terrorist attacks with explosives. The blast wave typical parameters, the properties of blast loads and their distinction from seismic effects, the sequence for blast loads calculation and the methods for artificially created protection of the structure from explosion are considered. The conditions are determined under which blast loads can be considered as uniformly distributed ones. It is noted that if the impact angle between the blast wave from the exploding charge and the structure or the edge of the structural member or its end exceeds 45 degrees, then significantly reduced pressures and impulses act on the structure. In this sense, it is indicated that if the distance to the charge exceeds half the width and height of the structure or its member (provided that the charge is in the center of the structure or member), the loads on them can be approximately averaged. The terrorist threat levels for the regions of Ukraine are presented in accordance with Decree No. 92 dd. 18.02.2016 of the Cabinet of Ministers of Ukraine «On approving the Regulation on a unified state system for prevention, reaction and termination of terrorist acts and minimizing their consequences». The influences are determined that the building structure must withstand, and the methods are given for taking into account the degree of risk in the design. The main distinctions of blast and impact effects from ordinary loads, which are to be taken into account in construction design, are described and it is indicated that an additional set of dynamic structural behavior, which is usually not taken into account, in particular, such as material behavior and inertial effects, depending on the rate of actions, should be certainly taken into account in the calculation. The probability for aforesaid attack with explosives is established, and the principal strategy of using the geometry of a building or structure to attenuate the explosion effects is highlighted.

**Key words:** constructions, bridge structures, explosion, blast wave, blast loads, degree of risk.

*Надійшла до редколегії 23.12.2019 р.*