

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМ. В.Н.КАРАЗІНА

ФІЗИКО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології

**ЗАТВЕРДЖУЮ
ЗАВІДУЮЧИЙ КАФЕДРИ**

“ _____ ” _____ 20__ р.

_____ ст. викладач Квітковський Ю.В.
(науковий ступінь, наукове звання, прізвище та ініціали автора)

Методична розробка для проведення семінарського заняття
**ПОНЯТТЯ ПРО ВИБУХ. ВПЛИВ ВИБУХУ НА БУДІВЛІ ТА
СПОРУДИ. ВИБУХОЗАХИСТ**
(повне найменування теми заняття)

З навчальної дисципліни _____ Цивільний захист

Обговорено на засіданні кафедри

“ _____ ” _____ 20__ р.

Протокол № _____

1. **Загальні відомості про вибух**
2. **Поведінка будівельних конструкцій при вибухах**
3. **Розрахунок параметрів вибуху**

ЛІТЕРАТУРА

1. Типова навчальна програма нормативної дисципліни «Цивільний захист» для вищих навчальних закладів, затверджена заступником міністра освіти і науки, молоді та спорту України 31.03.2011р.
2. Закон України “Про цивільну оборону України”. – К.Голос України, 06.03.1993.(додаток – 24.03.1999р).
3. Закон України “ Про об’єкти підвищеної небезпеки”. – К.18.01.2001.- №2245- III.
4. Закон України "Про охорону навколишнього природного середовища". – К.: Відомості Верховної Ради України, 1991. – № 41. – Ст. 546.
5. Закон України "Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи". – К.: Відомості Верховної Ради України, 1991. – № 16. – Ст. 198; 1992., № 13. – Ст. 177.
6. Закон України "Про тваринний світ". – К.: Відомості Верховної Ради України, 1993. – № 18. – Ст. 191.
7. Закон України "Про екологічну експертизу". – К.: Відомості Верховної Ради України, 1995. – № 8. – Ст. 54.
8. Закон України “ Про правовий режим надзвичайного стану”. - К.Урядовий кур’єр, 14.06.2000.-№107.
9. Закон України “ Про аварійно – рятувальні служби”. - К.Урядовий кур’єр, 14.12.1999. - №1281.
- 10.Закон України “ Про захист населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру”. - К.Урядовий кур’єр, 16.09.2000. - №149.
- 11.Бикова О.В. Болієв О.В., Деревинський Д.М., Єлісеєв В.Н., Миронець С.М., Осипенко С.І., Півень Ю.О. та інш. Основи цивільного захисту: Навч. посібник К: 2008.– 223 с.

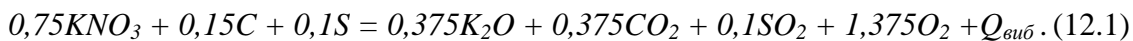
1 Загальні відомості про вибух

Досвід експлуатації обладнання з вибухопожежонебезпечними технологічними процесами (приміщення та будівлі категорій А та Б) свідчить, що в окремих випадках в результаті аварій, а також порушення режиму експлуатації технологічного обладнання та невиконання техніки безпеки під час виконання робіт виникають вибухи, які супроводжуються загибеллю людей, руйнуванням будівельних конструкцій та технологічного обладнання.

В даний час з метою інтенсифікації виробництв у різних технологіях широке застосування знайшла енергія вибуху, що акумульована у *вибухових речовинах* (ВР). При будівництві доріг, спорудженні гребель, при обробці твердих будівельних матеріалів, видобутку корисних копалин, у військовій техніці (усі види вибухових боєприпасів), у наукових дослідженнях будови гірських порід (сейсмовибухи), у космонавтиці (ракети на твердому паливі) широко використовують вибухові речовини. Поводження цих речовин при нагріванні, ударі, горінні істотно відрізняється від горіння інших горючих речовин.

Вибухові речовини (ВР) – ті, що здатні до вибухових перетворень. **Вибухові перетворення** – це швидка хімічна реакція, що супроводжується вибухом.

Викликати вибух можуть фізичні процеси та хімічні перетворення. Тому прийнято розрізняти вибухи фізичні та хімічні (теплові). До **фізичних** відносяться вибухи, при яких не відбуваються хімічні реакції. Це вибухи посудин, що працюють під тиском, вибухи електродинамічні і термодинамічні. **Хімічним** вибухом ВР називають хімічне перетворення, що самопоширюється з великою швидкістю і протікає з виділенням великої кількості тепла та утворенням газів. До хімічних вибухів відносяться вибухи конденсованих ВР, вибухи паливних газопароповітряних або пилоповітряних сумішей. Прикладом є вибух димного пороху, при якому відбувається швидка хімічна реакція між селітрою, сіркою і вуглецем, що супроводжується виділенням великої кількості теплоти. Таку хімічну реакцію можна записати у вигляді формули:



Газоподібні продукти, що утворилися, нагріваються за рахунок теплоти реакції до високої температури (кілька тисяч градусів) і мають високий тиск (сильно стиснуті). При розширенні ці гази роблять механічну роботу, тобто в ході вибуху відбувається звільнення накопиченого в речовині або в системі великого запасу енергії. Таким чином, можна визначити чотири умови, при яких хімічна реакція буде протікати у формі вибуху:

- а) екзотермічність;
- б) утворення газів;
- в) велика швидкість;
- г) здатність до самопоширення.

Вибух – це процес швидкого виділення великої кількості енергії, викликаного раптовим фізичним або хімічним перетворення речовини або суміші. Він може бути викликаний детонацією або фізичним розкладом речовин, а також під час хімічних перетворень, при швидкому згорянні газо-, паро- або пилоповітряних сумішей. Основною ознакою вибуху є миттєва зміна тиску, який залежить від температури та об'єму продуктів горіння.

У найбільш широкому значенні слова *вибухом* називають фізичне або хімічне перетворення речовини, що супроводжується край швидким переходом його енергії в енергію стиску і руху вихідної речовини або продуктів його перетворення та навколишнього середовища.

При вибуху розрізняють дві стадії:

Перша стадія – перетворення того чи іншого виду енергії в енергію сильно стиснутих газів. У випадку вибуху димного пороху – це екзотермічна реакція, що протікає з дуже великою швидкістю і в якій утворюються сильно стиснуті гази та пари. При ядерному вибуху – це швидкопротікаючі ядерні або термоядерні реакції – реакції поділу або з'єднання атомних ядер, при яких звільняється велика кількість теплоти. Продукти реакції, оболонка атомної або водневої бомби і деяка кількість середовища навколо бомби миттєво перетворюються в нагріті до дуже високої температури гази, що мають високим тиском.

Друга стадія – миттєве розширення сильно стиснутих газів і парів. У процесі розширення потенційна енергія стиску звичайно переходить у механічну роботу. Ця робота приводить

навколишнє середовище в рух, що може викликати руйнування конструкцій, якщо виниклі напруги перевищують їх межу міцності. Унаслідок швидкості, з якою реакція проходить по ВР, гази, що утворюються, навіть при відсутності міцної оболонки, набувають високого тиску і здатні, розповсюджуючись по навколишньому середовищу, породжувати в ньому *ударні хвилі*, здійснювати сильний удар, що руйнує і розкидає перепони. Таким чином, украй швидкий прояв дії тиску, як правило, дуже великого, являє собою основну характерну ознаку вибуху.

Спостерігаються дві форми вибуху:

1. Гомогенний вибух має місце, коли відбувається одночасне і рівномірне нагрівання всієї системи вибухової речовини, у результаті чого по досягненні температури самозапалювання або вибуху виникає вибухове перетворення по всій масі речовини.
2. Вибух, що самопоширюється, має місце тоді, коли вибухове перетворення виникає в якій-небудь ділянці заряду ВР і потім поширюється по речовині. Він характеризується наявністю фронту перетворення, тобто вузької зони інтенсивної хімічної реакції, що відокремлює в кожен даний момент продукти реакції від вихідної речовини, що ще не прореагувала, і рухається з визначеною швидкістю. Швидкість поширення вибухового перетворення визначається відстанню, на яке переміщається фронт реакції в одиницю часу.

Унаслідок вибуху звичайно утворюються *вибухові хвилі*.

Вибухові хвилі поширюються у вигляді *ударних хвиль* або *хвиль стиску*. На фронті *ударних хвиль* стрибкоподібно змінюється тиск, щільність, температура, швидкість руху часток середовища (рис. 12.1). Для *хвиль стиску* характерна поступова зміна цих параметрів. Під тиском мається на увазі надлишковий тиск, який виникає у середовищі при проходженні вибухової хвилі. Параметри хвиль (тиск, час дії, швидкість поширення і т.п.) залежать від:

- джерела енергії вибуху;
- навколишнього середовища (повітря, ґрунт, вода);
- інтенсивності протікання хімічної реакції (режиму горіння);
- інших факторів.

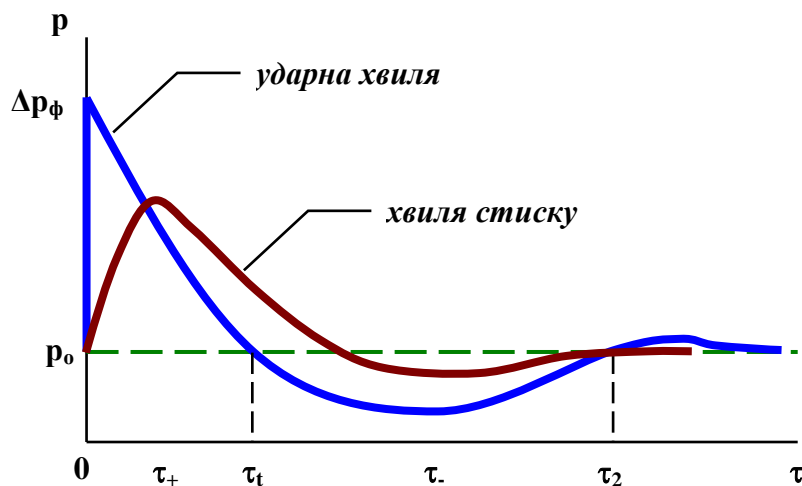


Рисунок 12.1 – Схема зміни тиску в часі у фіксованій на місці точці для ударної хвилі та хвилі стиску

Вибухові хвилі впливають на конструкції споруд як короткочасні динамічні навантаження. В залежності від призначення споруди та причин вибуху короткочасні динамічні навантаження можуть бути *експлуатаційними* та *аварійними*. При *експлуатаційних навантаженнях* у конструкціях не повинні виникати деформації, що порушують нормальну експлуатацію споруди. При *аварійних навантаженнях* у деяких конструкціях споруди можуть виникати пластичні деформації і, навіть, руйнації.

У залежності від механізму передачі теплоти від шару до шару ВР розрізняють два види вибухового перетворення: *детонацію* і *дефлаграцію* (горіння).

При *дефлаграційному процесі* (горінні) теплота, що виділяється в зоні реакції, передається шляхом теплопередачі від гарячих продуктів реакції до найближчого шару ВР, викликаючи в ньому,

у свою чергу, інтенсивну хімічну реакцію. Процес повторюється й у наступних шарах ВР. У цьому випадку хімічне перетворення поширюється при атмосферному тиску з дозвуковою швидкістю. Швидкість поширення сильно залежить від тиску, при якому протікає процес.

Фронт *дефлаграційного* горіння нагадує "*проникний поршень*", що створює при русі попереду себе *хвилю стиску*. Надмірний тиск ΔP_ϕ в хвилі стиску поступово збільшується від фронту хвилі до фронту полум'я. Хвиля стиску також утворює, так званий, *швидкісний натиск* – динамічне навантаження, що утворюється потоком повітря (див. додаток 42). *Швидкісний натиск* є основним руйнівним чинником для будівельних конструкцій. Максимальні значення надмірного тиску і *швидкісного натиску* досягаються перед фронтом полум'я, позаду якого утворюється вогненна куля з високою температурою випромінювання (1800...2500 °С).

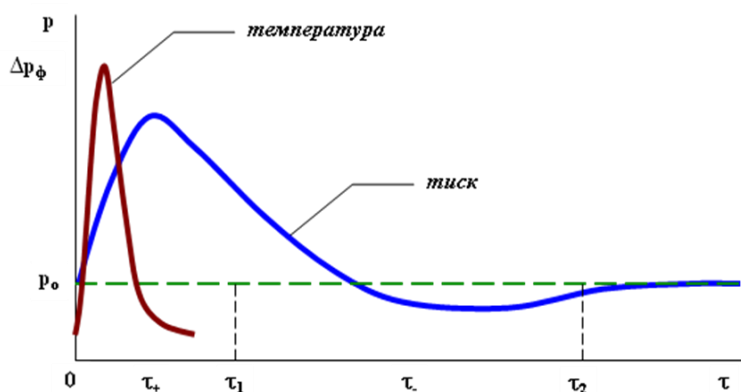


Рисунок 12.2 – Схема зміни тиску і температури в часі у фіксованій на місці точці при дефлаграційному вибуху

Коли горіння відбувається в незамкнутому просторі, воно не супроводжується ані характерним звуковим ефектом, ані механічною роботою. У замкнутому ж просторі процес протікає енергійніше: швидко піднімається тиск, у зв'язку з чим збільшується швидкість горіння. При горінні в замкнутому об'ємі, наприклад у зарядній камері гармати або в шпурі, характерно більш-менш швидко, але не різке наростання тиску газів до значень декількох сотень МН/м² (декількох тисяч атмосфер).

При *детонаційному процесі* механізм поширення хімічного перетворення ВР обумовлений передачею енергії від шару до шару хвилею стиску, тобто ударною хвилею. У цьому випадку хімічне перетворення поширюється по речовині з надзвуковою швидкістю або швидкістю, близькою до швидкості звуку.

Детонація може виникнути при наявності деяких умов, при яких горіння вибухових речовин стає нестійким, швидкість його починає збільшуватися, а, починаючи з деякого її значення, змінюється режим вибухового перетворення – виникає *ударна хвиля*. Швидкість ударної хвилі продовжує наростати, але до деякого граничного значення. Таким чином, швидкість вибухового перетворення, що протікає по механізму детонації, безупинно зростає від мінімального до граничного, постійного значення.

Детонація характеризується різким стрибком тиску в місці вибухового перетворення до 30-40 млн. Н/м² (300-400 тис. кгс/см²) і дуже різкою дією на навколишнє середовище. У момент підходу ударної хвилі до перешкоди тиск стрибком підвищується від атмосферного P_0 до значення $P_0 + \Delta P_\phi$ у фронті хвилі, а потім поступово убуває (рис. 12.3). Після часу τ_t від моменту приходу ударної хвилі фаза стиснення переходить у фазу розрядки, але максимальна розрядка $\Delta P < 0,3\Delta P_\phi$. Одночасно з тиском у фазі стиснення виникає рух повітря у напрямі розповсюдження хвилі – *швидкісний натиск*, який рухається за фронтом ударної хвилі.

Безпосереднє ураження ударною хвилею виникає в результаті дії надлишкового тиску та швидкісного натиску повітря. Ступінь пошкодження будівель та споруд в залежності від їх конструктивних особливостей визначається або надлишковим тиском, або швидкісним натиском. Наприклад, при невеликих розмірах об'єкту ударна хвиля майже миттєво охоплює його та надає сильного тиску (людиною миттєве підвищення тиску сприймається як різкий удар). В той же час

швидкісний натиск утворює сильний лобовий тиск на об'єкт, який обумовлює його зсув у просторі та/або перекидання.

У фазі розрядки повітря рухається у зворотному напрямі. А на дальніх відстанях ударні хвилі від вибухів переходять в слабкі хвилі стиску.

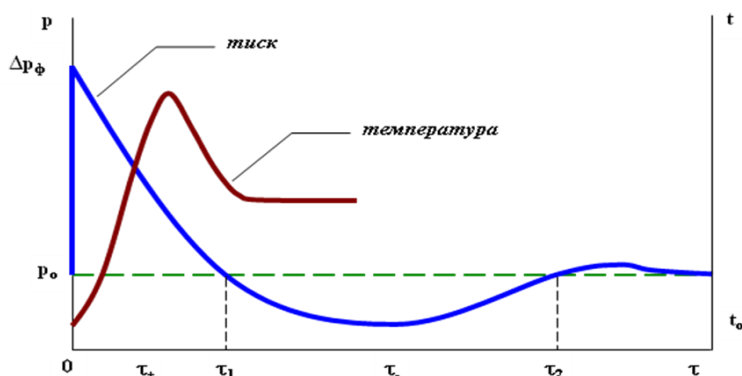


Рисунок 12.3 – Схема зміни тиску і температури в часі у фіксованій на місці точці при детонаційному вибуху

Класифікація вибухових речовин (ВР) здійснюється за декількома ознаками:

- 1) за агрегатним станом – гази, рідини і тверді речовини;
- 2) за складом – однорідні речовини і суміші;
- 3) за приналежністю до певного класу хімічних сполук;
- 4) за ступенем стійкості горіння.

Більшість вибухових речовин є твердими тілами (наприклад, тротил, ксиліл і т.п.). Менш поширені, але так само різноманітні рідкі вибухові речовини. Вибуховими речовинами можуть бути і гази, наприклад суміші повітря з парами бензину або горючими газами. Так суміш повітря з газом метаном приводить до вибухів у шахтах, якщо в них не забезпечена правильна вентиляція. Нарешті, вибуховою системою може бути пилоповітряні горючі суміші, наприклад вугільний пил, пил борошна і т.п.

ВР, що належать до одного класу хімічних сполук, можуть значно розрізнятися по стійкості горіння, тобто по характеру вибухового перетворення, а отже й по можливостях їхнього застосування. По зазначених ознаках розрізняють три групи ВР:

Група I – ініціюючі (первинні) вибухові речовини (ІВР). Вони легко вибухають від простих видів зовнішнього впливу – полум'я, удару, тертя. Тому вони служать для збудження детонації бризантних ВР. Найважливішими представниками ІВР є гримуча ртуть, тетразен, азид свинцю та ін. Призначення ІВР – запалення порохових зарядів, сповільнювачів у дистанційних трубках і підрильниках та інших об'єктів.

Група II – бризантні або подрібнювальні (вторинні) вибухові речовини (БВР). Характерним видом вибухового перетворення ВР цієї групи є детонація. У звичайних умовах БВР не здатні вибухати від підпалювання, тому для виникнення їх детонації застосовують ІВР. БВР застосовують головним чином для спорядження боєприпасів і для підривних робіт.

Група III – металеві вибухові речовини (МВР) або порохи. Для речовин цієї групи характерним видом вибухового перетворення є горіння, що не переходить у детонацію. Для збудження горіння необхідна дія полум'я.

Таким чином, вибух заряду ВР може бути збуджений вибухом іншого заряду. Заряд, що вибухає першим, називають **ініціюючим зарядом**. Заряд, що вибухає під впливом вибуху активного заряду, називають **пасивним зарядом або зарядом, що ініціюється**.

2 Поведінка будівельних конструкцій при вибухах

В залежності від величини тиску розрізняють 4 ступеня руйнування будівель.

1. **Слабка ступінь руйнування** – руйнування скла, легких перегородок, відкриття *легкоскидних конструкцій (ЛСК)*, дверей, воріт відбувається при надмірному тиску ударної хвилі від 5 до 20 кПа.

Основні будівельні конструкції не руйнуються. Ступінь пошкодження – 10...30 %. Усунення наслідків – за допомогою малого або середнього ремонту.

2. *Середня ступінь руйнування* – руйнування плит покриття, перекриття, стін із цегли завтовшки 51 см, бетонних стін завтовшки 26 см починається при надмірному тиску ударної хвилі від 20 до 30 кПа. Ступінь пошкодження – 30...60 %. Усунення наслідків – за допомогою капітального ремонту.

3. *Сильна ступінь руйнування* – руйнування будівель із сталевим каркасом, стін із цегли завтовшки 64 см, бетонних стін завтовшки 36 см починається при надмірному тиску ударної хвилі від 30 до 50 кПа. Ступінь пошкодження – 50...90 %. Доцільність капітального ремонту сумнівна.

4. *Повне руйнування* – Відбувається при надмірному тиску ударної хвилі більш 50 кПа. Ступінь пошкодження – 90...100 %. Доцільне розбирання завалів та очищення території (див додаток 41).

Питанням запобігання вибухів приділяється багато уваги. Це регулювання параметрів технологічних процесів, влаштування автоматичних сигналізаторів довибухової концентрації речовин, застосування об'ємно-планувальних та конструктивних рішень.

Вибухобезпечність об'єктів в будівництві повинна забезпечуватися:

- системою інженерно-технічних заходів:
 - системою запобігання вибуху (вибухопопередження);
 - системою противибухового захисту (вибухозахист) тощо;
- системою організаційних заходів.

Противибуховий захист – комплекс організаційних заходів та технічних засобів, спрямованих на запобігання впливу на людей небезпечних факторів вибуху. Іншими словами **вибухозахист** – це заходи, що забезпечують захист обслуговуючого персоналу, технологічного устаткування, а також будівель і споруд від небезпечних і шкідливих дій вибуху, основними з яких є:

- максимальний надмірний тиск ΔP_{ϕ} ;
- зруйновані конструкції будівель, устаткування, комунікацій і їх частини, що розлітаються;
- небезпечні чинники пожежі (відкритий вогонь і іскри, токсичні продукти горіння, дим і т.д.).

До будівельних заходів щодо вибухопопередження і вибухозахисту відносяться:

- раціональне планування території підприємства;
- розташування на ній технологічних установок, будівель і споруд, що забезпечує ефективне провітрювання і що виключає утворення зон можливого скупчення вибухонебезпечної пари і газів;
- розміщення будівель адміністративного, господарчо-побутового призначення поза зоною небезпечної інтенсивності дії вибухової хвилі;
- раціональне взаємне розміщення технологічних установок і виробничих будівель з урахуванням дії на них вибухової хвилі, що виключає можливість послідовного розвитку аварії;
- влаштування захищених пунктів управління технологічними процесами у вибухонебезпечних будівлях (операторні);
- використання запобіжних (легкоскидних) конструкцій (стекол глухого скління, стулок віконних палітурок, дверей, воріт, легкоскидних стінних панелей і покриттів, що відкриваються назовні);
- обмеження розливу рідини при можливих аваріях (пристрій обвалування, піддонів і т.д.);
- обґрунтований вибір матеріалів і влаштування поверхонь (твердих покриттів), що знижують швидкість тепловіддачі, кількість рідини, що випарувалася, і пр.;
- розміщення технологічного устаткування на відкритих етажерках і майданчиках і т.д.

Вибухотривкість – граничний тиск у фронті вибухової хвилі, який можуть сприйняти конструкції будівлі без втрати ними несучих здібностей або придатності до подальшої експлуатації.

2.1 Особливості вибухозахисту при загрозі зовнішніх вибухів

При проектуванні та розрахунках будівельних конструкцій треба мати на увазі особливості їх поведінки при впливі навантажень, що виникають при вибухах. Під впливом ударної хвилі будівлі і споруди поведуться як пружні коливальні системи. Розрахункова оцінка такої дії вимагає рішення досить складних динамічних задач, пов'язаних з описом поведінки пружних конструктивних елементів будівель і споруд під впливом ударних навантажень, визначуваних такими, що змінюються в часі і просторі параметрами ударної хвилі. Виникаючі в конструктивних елементах навантаження залежать від параметрів хвилі, характеристик об'єкту, його розмірів і орієнтації щодо фронту хвилі.

Особливостями дії вибуху на будівельні конструкції є поєднання постійних та тимчасових навантажень з потужними короткочасними динамічними навантаженнями вибухових впливів з

вільною орієнтацією. Об'єкти, які з великою вірогідністю можуть опинитися під впливом вибухів, слід розраховувати на особливі поєднання навантажень. Але в будь-якому випадку треба підтверджувати розрахунками умову перевищення навантажень від вибуху над природними навантаженнями. Наприклад, конструкції, вузли і фундаменти будівель слід розраховувати тільки на основне поєднання навантажень, тобто без урахування дії вибуху при виконанні умови:

$$\Delta P_{\phi} < 2,5 \cdot W_0 \quad (12.2)$$

де ΔP_{ϕ} – надмірний тиск у фронті повітряної хвилі, що проходить, у фазі стиснення, визначуваний по відповідних методиках; W_0 – нормативне значення вітрового тиску.

На дію короткочасних динамічних навантажень будівельні конструкції розраховують по двом групам граничних станів:

- I – на відсутність руйнувань або відсутність пластичних деформацій конструкції;
- II – на відсутність надмірного розкриття тріщин або відсутність надмірного переміщення.

Руйнування конструкцій при вибухових впливах відбувається при перевищенні їх межі міцності розрахунковими навантаженнями або при зміщенні конструкцій на опорах. Дію ударної хвилі можна розглядати як рівномірно розподілене динамічне навантаження.

Руйнування згинальних конструкцій при дії вертикальної ударної хвилі відбувається, як і у випадку впливу пожежі, внаслідок утворення шарнірів пластичності.

Балка з шарнірно-обпертими кінцями під впливом рівномірно розподіленого статичного та динамічного навантажень руйнується внаслідок утворення в середині прольоту *шарніра пластичності* (рис 12.4, а).

Балка з защемленими кінцями під впливом рівномірно розподіленого статичного та динамічного навантажень руйнується внаслідок утворення спочатку двох шарнірів пластичності на опорах, а потім – шарніра пластичності в середині прольоту (рис 12.4, б).

Балка з одним защемленим кінцем і другим шарнірно-обпертим кінцем під впливом рівномірно розподіленого статичного та динамічного навантажень руйнується внаслідок утворення спочатку одного шарніру пластичності на опорі, а потім – шарніру пластичності в середині прольоту.

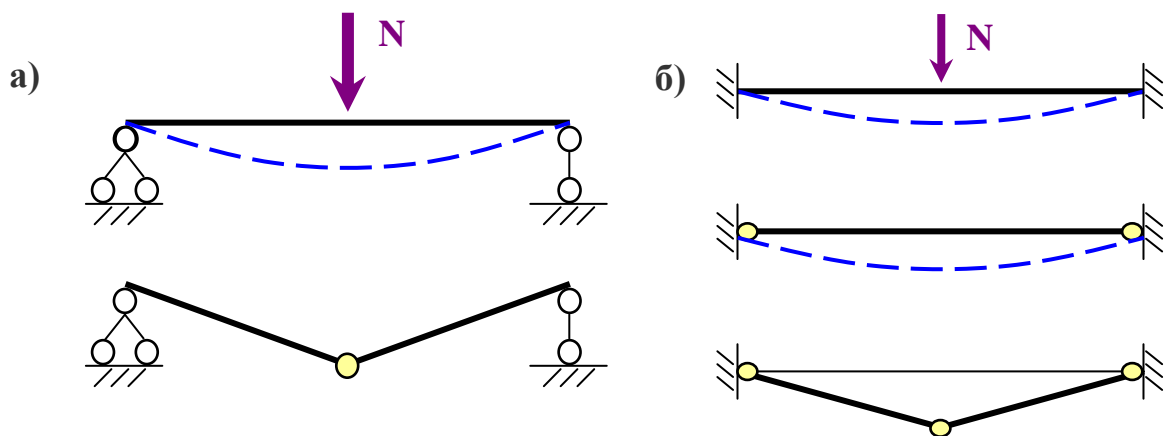


Рисунок 12.4 – Схема утворення пластичних шарнірів при впливі вибуху на згинальні конструкції

При дії на споруду вертикально направленої вибухової навантаження виникає зміщення опор перекриттів. Це зміщення може бути викликане деформаціями колон або стін, зміщенням опорних конструкцій та усієї споруди у цілому. В залежності від співвідношення поздовжнього та поперечного навантаження можливі два випадки руйнування залізобетонних колон:

- руйнування починається з досягнення межі текучості в розтягнутій арматурі з розвитком пластичних деформацій та з подрібнення бетону стиснутої зони;
- руйнування внаслідок подрібнення бетону при частково розтягнутому перерізі, але при відсутності пластичних деформацій в розтягнутій арматурі.

Особливі умови проектування передбачені до будівель управління виробництвом (операторних) вибухопожежонебезпечних хімічних, нафтохімічних і нафтопереробних підприємств,

в яких передбачено постійне перебування технічного персоналу. Існуючі будівлі операторних не витримують навантажень від аварійних вибухів газоповітряних палих сумішей (ГС). При традиційних конструктивних рішеннях ці будівлі довелося б розташовувати від джерела вибуху на відстанях більше кілометра, що економічно недоцільно і практично неможливо.

У вибухотривких будівлях повинна бути виключена можливість руйнування основних несучих і захищаючих конструкцій. Допускаються пошкодження конструкцій випадкового характеру, що не впливають на їх міцність, стійкість.

Забезпечення вибухотривкості при зовнішніх аварійних вибухах ГС може здійснюватися по двох напрямках:

- зниженням надмірного тиску P_{ϕ} , за рахунок віддалення будівель операторних від потенційних джерел вибуху ГС;
- підвищенням міцності і стійкості конструкцій до дії динамічних навантажень від повітряної хвилі вибуху ГС.

Вибухотривкі будівлі на територіях підприємств слід розташовувати:

- на відстанях від сусідніх будівель і споруд, що перевищують половину висоти більшого з них, але не менше визначених відстаней;
- на відмітках землі, вищих по відношенню до виробничих будівель, споруд і автомобільних залізниць, що проходять по території підприємства;
- торцевим фасадом до можливого джерела вибуху;
- з урахуванням рози вітрів і рельєфу місцевості.

У приміщеннях вибухотривких будівель слід передбачати системи вентиляції, опалювання, зв'язку, водопостачання, електропостачання і каналізації. Прокладка транзитних ліній водопроводу, каналізації, опалювання, електропостачання, а також трубопроводів стислого повітря, газопроводів і трубопроводів з перегрітою водою через вибухотривкі будівлі не допускається.

Систему вентиляції слід проектувати на два режими: чистої вентиляції (режим І) і фільтровентиляції (режим ІІ).

При дії розрахункових навантажень, що перевищують 400 кПа, каналізаційні стояки повинні бути поміщені в сталеві труби або залізобетонні коробки, надійно закладені в конструкції підлоги.

Об'ємно-планувальні рішення.

Вибухотривкі будівлі операторних слід проектувати одноповерховими, невеликого розміру, простої форми в плані, без перепаду висот суміжних ділянок, з організованим зовнішнім водостоком. Фасади вибухотривких будівель повинні бути простими – без виступаючих частин, виїмок і ніш, а зовнішні стіни – обтічними і гладкими, тобто без архітектурних деталей, парпетних плит, козирків, технологічного устаткування на покритті і т.п.

Висоту приміщень слід приймати мінімально можливої, але не менше 2,4 м. Висота від підлоги до низу виступаючих частин комунікацій, устаткування і будівельних конструкцій в місцях регулярного проходу людей і на шляхах евакуації – не менше 2,2 м, а в місцях нерегулярного проходу людей – не менше 2,0 м.

Входи і віконні отвори слід розташовувати на бічних і задньому по відношенню до можливого напрямку розповсюдження вибухової хвилі фасадах вибухотривких будівель. Кількість входів в будівлю операторної повинна бути, як правило, не менш 2-х.

Для входів в будівлю операторної слід влаштовувати тамбури, обладнані зовнішніми захисно-герметичними дверима, що сприймають розрахункові навантаження, і внутрішніми герметичними дверима. Двері тамбура повинні відкриватися назовні.

Фільтровентиляційні приміщення (ФВП) повинні примикати до зовнішніх стін будівлі операторної і розмішуватися поблизу входів в будівлю.

Конструктивні рішення.

Вибухотривкі будівлі операторних проектуються каркасними з повним або неповним каркасом і безкаркасними, зокрема з монолітного залізобетону.

Зовнішні захисні стінові конструкції можуть виконуватися із збірних панелей, монолітного залізобетону з утеплювачем, тришарових панелей з посиленням шаром залізобетону, ребристих плит з шаром утеплювача між ребрами, наприклад, легкого бетону і т.д. Для каркасних будівель

операторних слід застосовувати збірно-монолітні покриття, що складаються із збірних залізобетонних плит і монолітних ділянок.

Як кроквяні конструкції застосовуються залізобетонні балки, сталеві балки зварні або з прокатних профілів.

Установка колон по координатійних осях з кроком 2 м дозволяє збільшити несучу здатність типових стінних панелей більш ніж в 15 разів.

У покритті вибухотривких будівель слід використовувати залізобетонні балки встановлювані з кроком, що дозволяє сприймати задані навантаження. Якщо типові збірні балки запроектовані на навантаження 10 кН/м^2 і крок 12 м, то установка цих балок через 1,5 м дозволить збільшити їх несучу здатність в 10 разів (з урахуванням динамічних опорів бетону і арматури).

Незмінність каркасів вибухотривких будівель по поперечних координатійних осях забезпечується жорсткістю стін, колон і затисканням колон у фундаменти, а по подовжніх осях, крім того, вертикальними сталевими зв'язками.

Збірно-монолітні конструкції покриття слід проектувати нерозрізними з установкою надпорної арматури в шарах з монолітного залізобетону.

Обрамлення вхідних і монтажних отворів рекомендується проектувати із сталевих профілів і кріпити до стін за допомогою анкерів.

Приміщення вибухотривких будівель повинні бути герметичними, якщо при аварійній ситуації можливо задимлення або загазованість будівель небезпечними для життєдіяльності персоналу речовинами.

2.2 Особливості вибухозахисту при загрозі внутрішніх вибухів

Надмірний тиск при внутрішньому дефлаграціонном вибуху в замкнутому об'ємі досягає 700...900 кПа. При вибухах усередині будівель і споруд, надмірний тиск не повинен перевищувати значень, що перевищують несучу здатність будівельних конструкцій. Максимальний тиск, який здатні витримати будівлі з цегляними стінами складає 2...4 кПа, а будівлі з залізобетонними типовими стінами та перекриттями – 8...10 кПа.

Основною причиною виникнення вибухонебезпечної ситуації в житлових будинках є витік газу. Вибухонебезпечна концентрації на кухні може реалізуватися при одній не засвіченій газовій конфорці. При цьому час формування вибухонебезпечної хмари достатньо великий і складає, залежно від часу початку витіку, від 10 до 25 годин. Наявність постійної (навіть незначної) вентиляції істотно підвищує рівень вибухобезпечності, оскільки різко знижує здатність формування вибухонебезпечних хмар в житлових приміщеннях. Таким чином, вірогідність вибуху значно зростає при погіршенні якості вентиляції.

Двохстадійний аварійний дефлаграціонний вибух.

Газопароповітряні суміші здібні до горіння тільки при певній концентрації горючої компоненти в повітрі, тому аварійні вибухи в житлових будівлях часто носять багатостадійний характер. Вибухові виляски (хлопки) можуть слідувати один за іншим, тобто бути рознесеними в часі на декілька секунд.

До особливостей дефлаграційних вибухів усередині приміщень слід віднести формування могутніх повітряних потоків в міжквартирних і міжкімнатних проходах, коридорах і т.д. Саме *швидкісний натиск* цих потоків (а не ударні хвилі) приводить до викиду фрагментів будівельних конструкцій і предметів з аварійної квартири. Руйнування конструкцій може відбуватися і під дією надмірного тиску, але подальший їх викид відбувається під дією швидкісного натиску.

Якщо у момент початкового вибуху на кухні двері в коридор квартири закриті, то реалізується «виляск» і подальша незначна пожежа на кухні.

Якщо двері на кухні у момент першого «виляску» відкриті, то суміш через дверний отвір спрямовується в сусідні кімнати, турбулізується і збагачується киснем (рис. 12.5). В результаті формується добре підготовлена до горіння вибухонебезпечна хмара, яка через незначний проміжок часу (через 10-15 секунд) вибухає, що приводить до вторинного вибуху, який заподіює основні руйнування будівлі.

Причинами значних руйнувань житлових будівель при аварійних вибухах газопароповітряної суміші можуть бути:

– мала несуча здатність будівель щодо горизонтальних навантажень;

– установка в приміщеннях з газовими приладами посилених варіантів скління.

Вищою несучою здатністю щодо подібних вибухів володіють панельні будівлі та будівлі каркасного типу (див. додаток 41). А особливо небезпечно, коли газопароповітряна хмара формується у замкненому просторі, наприклад, у підвальних приміщеннях.

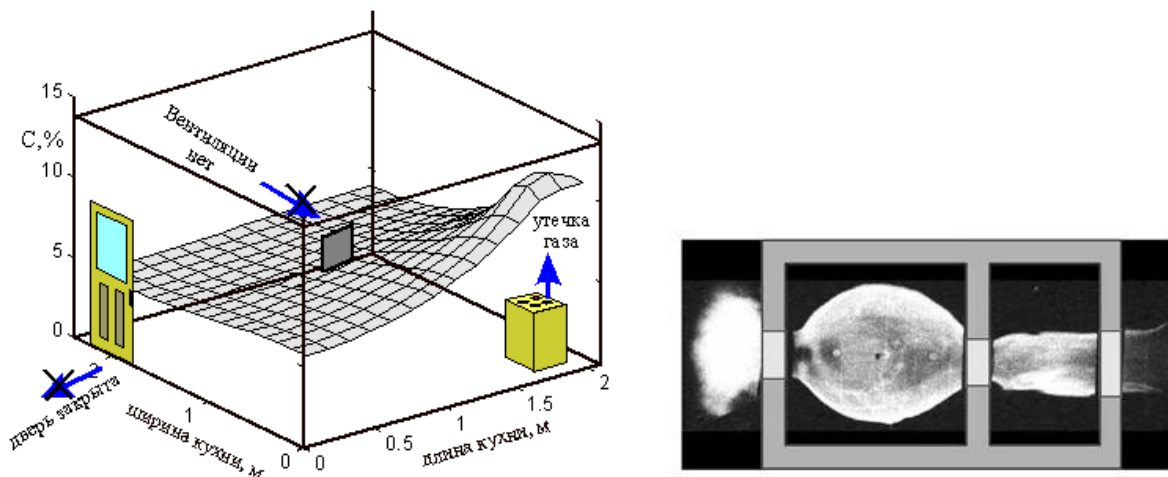


Рисунок 12.5 – Схема вибуху газоповітряної суміші всередині приміщення

Забезпечення вибухозахисту промислових будівель при внутрішніх аварійних вибухах може здійснюватися по двох напрямках:

- зниженням надмірного тиску, що виникає при внутрішньому аварійному вибуху;
- підвищенням міцності і стійкості конструкції до дії аварійних (вибухових) навантажень.

Поєднання обох вказаних напрямків є необхідною умовою розробки оптимальних рішень по забезпеченню вибухотривкості будівель при внутрішніх аварійних вибухах.

Для зниження надмірного тиску, що виникає при внутрішніх аварійних вибухах, використовуються **запобіжні (легкоскидні) конструкції (ЗК)**: стекла глухого скління приміщень і віконних палітурок (руйнівні ЗК), що відкриваються всередину стулок, стулки віконних палітурок, дверей і комір (обертові ЗК), що відкриваються назовні, а також легкоскидні стінні панелі і полегшені плити покриттів приміщень (зміщувані ЗК). Стінні панелі можуть бути запроектовані як обертові ЗК.

Запобіжні конструкції встановлюються в приміщеннях будівель або пожежних відсіків категорій А і Б.

За допомогою ЗК надмірний тиск в приміщенні при аварійному вибуху знижується до допустимої величини ($P_{дон}$). При проектуванні будівель вибухонебезпечних виробництв надмірний тиск приймають, як правило, від 3 до 5 кПа. Нижнє значення надмірного тиску відповідає будівлям, конструкції яких не розраховані на дію аварійного вибуху. При зменшенні $P_{дон}$ площа запобіжних конструкцій збільшується.

Якщо необхідна площа отворів перекривних ЗК не може бути розміщена в стінах будівлі і ліхтарях, то їх слід розташовувати в покритті вибухонебезпечного приміщення; при цьому легкоскидні покриття можуть бути достатньо ефективними тільки при порівняно великому значенні надмірного тиску вибуху.

У будівлях і приміщеннях вибухонебезпечних виробництв повинна бути виключена можливість руйнування основних несучих і захищаючих конструкцій при розрахунковій величині вибухових навантажень. Допускаються пошкодження конструкцій випадкового характеру, що не впливають на їх міцність і стійкість, а також експлуатаційні характеристики, і що вимагають незначних матеріальних витрат на ліквідацію цих пошкоджень.

Об'ємно-планувальні і конструктивні рішення.

Форма вибухонебезпечних приміщень повинна бути по можливості простою. Елементи несучих, захищаючих і огорожувальних конструкцій, а також устаткування не повинні приводити до значної інтенсифікації вибухового горіння ГС унаслідок звуження перетинів приміщень на шляху розповсюдження полум'я.

При розробці об'ємно-планувальних рішень вибухонебезпечних приміщень необхідно прагнути до того, щоб лінійні розміри їх по довжині, ширині і висоті не більше ніж в п'ять разів відрізнялися один від одного.

Запобіжні конструкції слід розміщувати якомога ближче до очікуваних місць займання горючої суміші (ГС), що утворюється в аварійних ситуаціях у вибухонебезпечному приміщенні.

За відсутності даних про місця можливого займання ГС в приміщеннях, лінійні розміри яких по довжині, ширині і висоті не більше ніж в три рази відрізняються один від одного, ЗК слід розміщувати рівномірно за площею стін приміщення, а при необхідності і в його покритті.

У сильно витягнутих в довжину приміщеннях ЗК розташовують, як правило, в бічних стінах по довжині приміщення, а також в його покритті. У приміщеннях, що мають велику висоту (більше 6 м), ЗК розміщують переважно в їх стінах.

У отворах, що відокремлюють вибухонебезпечні приміщення від інших виробничих приміщень, слід встановлювати двері, люки, ворота і т.д., які не повинні руйнуватися або відкриватися під дією надмірного тиску. За наявності відкритого отвору в стіні між двома приміщеннями обидва приміщення повинні вважатися вибухонебезпечними навіть в тому випадку, якщо виникнення або займання ГС можливі тільки в одному приміщенні.

В приміщеннях, де можуть утворюватися вибухонебезпечні пальні суміші, поверхня стін, стель і підлог повинна бути гладкою, без борозен, без виступаючих елементів і ніш. Кути і пази між підлогами і стінами повинні бути згладжені і закруглені.

У одноповерхових виробничих будівлях вибухонебезпечних виробництв слід приймати найменшу сітку колон, що задовольняє технологічним вимогам.

Багатоповерхові виробничі будівлі в обох напрямках координаційних осей проектується переважно у вигляді рамних або рамно-зв'язкових систем. Зв'язкові каркаси застосовувати для вибухонебезпечних будівель не рекомендується.

Стики з'єднань елементів рекомендується виконувати жорсткими для створення ефективніших статично невизначених систем і забезпечення просторової жорсткості будівель.

Стекляне застосування приміщень можуть працювати достатньо ефективно як ЗК тільки в тому випадку, якщо час утворення отворів у віконних палітурках при руйнуванні стекол буде набагато менше тривалості горіння ГС. Одним з прийомів, що забезпечує розтин стекол, зокрема різних розмірів, є їх надрізка або ослаблене кріплення скла.

При дефлаграційному горінні ГС навантаження, що діє на скла, може бути прийнята рівній надмірному тиску P_{ϕ} , що виникає в приміщенні, помноженому на коефіцієнт, рівний 1,2.

Руйнівними ЗК в світлоаераційних і аераційних ліхтарях використовуються скла глухого скління і що відкриваються всередину стулок і фрамуг віконних палітурок, а обертовими ЗК – стулки, що відкриваються назовні, і фрамуги віконних палітурок.

3 Розрахунок параметрів вибуху

Для ухвалення рішень по захисту від дії повітряної ударної хвилі (ПУХ) вибуху на будівлі, споруди, техніку або на людей, а також для вироблення заходів вибухобезпечності необхідні дані, що характеризують вибухи. Найбільш достовірні відомості про вибух можна одержати шляхом проведення експерименту. Проте, такий підхід не завжди застосовний. Тому найбільш поширені розрахункові методи, що дозволяють визначати значення параметрів, що характеризують вибухи. В ході розрахунків використовуються наступні показники:

- вигляд і кількість вибухової речовини (ВР);
- умови вибуху;
- відстань від місця вибуху до місця оцінки його наслідків;
- параметри ударної хвилі;
- ступінь пошкодження (руйнування) будівель, споруд, техніки або ступінь ураження людей.

Для проведення розрахунків розроблено і представлено значну кількість функціональних залежностей, які зв'язують між собою ці показники. Конкретний вид розрахункових співвідношень, що виражають ці функціональні залежності, визначається умовами вибуху, до яких відносяться:

1) тип ВР:

- конденсовані ВР;
- газоповітряні суміші;
- пилоповітряні суміші і ін.;

- 2) місце вибуху:
 - повітряний;
 - наземний;
 - заглиблений вибух;
- 3) наявність перешкод, що відбивають ударну хвилю і інші умови.

При оцінюванні ступеня впливу вибуху на будівельні конструкції та людей до небезпечних параметрів вибуху відносять:

- температуру;
- тиск;
- швидкість нарощування тиску;
- швидкість розповсюдження горіння;
- час (протяжність) вибуху (який складає, звичайно, 0,05...0,6 секунди).

Енергія вибуху приводить до стиснення продуктів вибуху і навколишнього середовища, різкої зміни тиску. Витрати тепла під час цього дуже незначні. Практично 90 % тепла іде на нагрів продуктів горіння. Температура продуктів горіння при вибуху визначається:

$$T_e = 0,9 T_p, \quad (12.3)$$

де: T_p - теоретична (розрахункова) температура продуктів горіння, К.

Кількість вибухової речовини або її масу C при проведенні розрахунків виражають через *тротиловий еквівалент* M_T . **Тротиловий еквівалент** є масою тротилу, при вибуху якої виділяється стільки ж енергії, скільки виділиться при вибуху заданої кількості конкретного ВР. Значення тротилового еквівалента визначається по співвідношенню:

$$M_T = K_{ef} C, \quad (12.4)$$

де: C – маса вибухової речовини; K_{ef} – коефіцієнт приведення вибухової речовини до тротилу (див. додаток 37).

Вираз (12.4) складений для вибуху, при якому ударна хвиля розповсюджується у вигляді сфери. Коли вибух відбувається на деякій поверхні, ударна хвиля розповсюджується в повітрі у вигляді півсфери. Для вибухів на абсолютно твердій поверхні вся енергія, що виділилася при вибуху, розповсюджується в межах півсфери і, отже, значення маси вибухаючої речовини як би подвоюється. Для вибуху на не абсолютно твердій поверхні, наприклад, на ґрунті, частина енергії витрачається на утворення воронки. Облік цієї витрати виконується за допомогою коефіцієнта η (наприклад, для ґрунту $\eta = 0,6$; для бетону $\eta = 0,95$). M_T в загальному випадку визначається по формулі:

$$M_T = 2\eta K_{ef} C. \quad (12.5)$$

За *законом подібності кубічного кореня* значення параметрів ударної хвилі для вибуху деякої потужності можна перерахувати для вибухів інших потужностей, користуючись виразами закону подібності:

$$r_2 = r_1 \sqrt[3]{M_{T2}/M_{T1}}, \quad \tau_2 = \tau_1 \sqrt[3]{M_{T2}/M_{T1}}, \quad (12.6)$$

де: r_2, r_1 – відстані від центрів двох вибухів до деяких точок 1 і 2, в яких параметри ударної хвилі цих вибухів рівні між собою; τ_2, τ_1 – час з моменту вибуху до приходу ударної хвилі в ці точки; M_{T2}, M_{T1} – відповідні тротилові еквіваленти зарядів.

Ґрунтуючись на цих залежностях, отримують приведений радіус вибуху R_{np} , яким зручно користуватися в різних розрахункових співвідношеннях для визначення параметрів ударної хвилі вибуху.

$$r_2/\sqrt[3]{M_{T2}} = r_1/\sqrt[3]{M_{T1}} = r/\sqrt[3]{M_T} = R_{np} \quad (12.7)$$

Різниця між вибухами конденсованих ВР і ГПС обумовлює особливості їх впливу на будівельні конструкції та особливості відповідних розрахунків.

3.1 Розрахунок параметрів вибуху при підриві заряду конденсованої вибухової речовини

При підриві заряду конденсованої ВР утворюється *осередок вибуху*, ударні хвилі якого здатні викликати великі руйнування на будівельних об'єктах. В залежності від місця підриву ВР розрізняють повітряний, наземний або заглиблений вибух.

Таким чином, при розрахунках для оцінювання пошкоджень треба розглянути впливи на будівлі та споруди від:

- 1) продуктів вибуху та розльоту осколків;
- 2) впливу ударної хвилі;
- 3) сейсмічного ефекту вибуху.

1. Вплив продуктів вибуху та розльоту осколків.

При підриві заряду ВР на поверхні землі максимальний радіус розльоту осколків r_{max} , м, визначають за формулою:

$$r_{max} = 238 \sqrt[3]{C}, \quad (12.8)$$

де C – загальна маса заряду ВР, кг, яку визначають за формулою:

$$C = C_1 K_{ef} + C_2, \quad (12.9)$$

де C_1 – маса діючого заряду ВР, кг; K_{ef} – коефіцієнт ефективності ВР в порівнянні із зарядом тротилу тієї ж маси (див. додаток 37); C_2 – маса зовнішнього контактного заряду тротилу для підриву діючого заряду ВР, кг (див. додаток 38).

2. Вплив ударних хвиль при вибуху.

Надлишковий тиск ΔP_ϕ для сферичної повітряної ударної хвилі, що вільно розповсюджується, убуває у міру видалення від місця вибуху. Тому розрахунок його значень звичайно проводиться на підставі співвідношень, в яких тиск є функцією двох аргументів – маси ВР і відстані від місця вибуху.

Швидкість спаду значення ΔP_ϕ у міру видалення від місця вибуху змінюється за рахунок впливу на ударну хвилю середовища, в якому вона розповсюджується. Чим більше відстань від місця вибуху, тим сильніше спотворюється характер зміни тиску у фронті ударної хвилі.

З викладених причин в технічній літературі представлений достатньо широкий спектр розрахункових співвідношень для визначення значень ΔP_ϕ , кожне з яких має свою сферу застосування і призначення. Наприклад, для повітряного вибуху, для наземного вибуху, для малих відстаней від місця вибуху, для значних відстаней від місця вибуху, для невеликих зарядів ВР, для крупних зарядів ВР і т.д.

Вплив ударних хвиль на конструкції та споруди розрізняється при вибуху у повітрі та при вибуху на поверхні землі.

Ударні хвилі при вибуху у повітрі.

Закони зміни тиску в повітряній ударній хвилі в часі не залежать від виду вибухової речовини. Головна особливість цієї хвилі – різке зростання тиску в її фронті, що рухається, від P_o (вихідний атмосферний тиск) до максимального значення $P_o + \Delta P_\phi$ і потім падіння до атмосферного тиску P_o . Час τ_+ , протягом якого тиск падає з $P_o + \Delta P_\phi$ до P_o , визначає тривалість фази стиску (рис. 12.3). Фаза стиску змінюється фазою розрідження, у якій тиск виявляється нижче атмосферного. Механічна дія ударної хвилі на спорудження в більшості випадків визначається тиском у фазі стиску, оскільки воно звичайно перевищує тиск у фазі розрідження. При визначенні навантажень, що виникають при дії

ударної хвилі на перешкоду, необхідно враховувати умови її взаємодії з перешкодою (відбиття, обтікання, затікання).

Основні параметри повітряної ударної хвилі при поширенні в повітрі від центра вибуху (минаюча хвиля) визначають по емпіричних формулах.

При повітряному вибуху тротилового заряду:

– надлишковий тиск на фронті ударної хвилі (МПа):

$$\Delta P_{\phi} = 0,084 \frac{\sqrt[3]{C}}{r} + 0,27 \frac{\sqrt[3]{C^2}}{r^2} + 0,7 \frac{C}{r^3} \quad (12.10)$$

де C – маса тротилового заряду, кг; r – відстань від центра вибуху до перешкоди, м. Враховуючи (12.7) формулу (12.10) можна записати у вигляді формули Садовського:

$$\Delta P_{\Phi} = \frac{84}{R_{np}} + \frac{270}{R_{np}^2} + \frac{700}{R_{np}^3} . \quad (12.11)$$

При необхідності можна вирішувати зворотну задачу, тобто визначати відстань від місця вибуху по заданому значенню ΔP_{ϕ} , користуючись співвідношенням:

$$R_{np} = \sqrt[3]{\left[1 + \frac{337}{\Delta P_{\Phi}}\right]^2 - 1} ; \quad (12.12)$$

– тривалість фази стиску (с):

$$\tau_{+} = 1,5 \cdot 10^{-3} \sqrt[3]{C} \sqrt{r} ; \quad (12.13)$$

– імпульс тиску у фазі стиску, віднесений до поверхні фронту хвилі площею 1 м²;

$$i = 4 \frac{\sqrt[3]{C^2}}{r} \quad (\text{МПа} \cdot \text{с}). \quad (12.14)$$

Ударні хвилі при наземному вибуху.

При вибуху заряду у ґрунті виникає подрібнення ґрунту і руйнування його структури з утворенням воронки. За межами воронки вибухові хвилі розповсюджуються у вигляді ударних хвиль або хвиль стиснення. Також виникають хвилі у ґрунті внаслідок розповсюдження над поверхнею повітряної ударної хвилі.

При наземному вибуху тротилового заряду, враховуючи те, що ударна хвиля розповсюджується в повітрі у вигляді півсфери, надлишковий тиск на фронті ударної хвилі, тривалість фази стиску, імпульс тиску у фазі стиску розраховують по формулам:

$$\Delta P_{\phi} = 0,1 \frac{\sqrt[3]{C}}{r} + 0,43 \frac{\sqrt[3]{C^2}}{r^2} + 1,4 \frac{C}{r^3} \quad (\text{МПа}), \quad (12.15)$$

$$\tau_{+} = 1,7 \cdot 10^{-3} \sqrt[3]{C} \sqrt{r} \quad (\text{с}), \quad (12.16)$$

$$i = 6,3 \frac{\sqrt[3]{C^2}}{r} \quad (\text{МПа} \cdot \text{с}). \quad (12.17)$$

Радіус руйнуючої дії повітряної ударної хвилі r_{yx} визначають за формулою:

$$r_{yx} = a\sqrt{C}, \quad (12.18)$$

де C – маса заряду, що підривається, у тротиловому еквіваленті, кг; a – коефіцієнт пропорційності, величина якого залежить від умов вибуху та інтенсивності руйнувань (див. додаток 36). Коефіцієнт a для деяких випадків також можна визначити за формулами, наприклад, при пошкодженні стіни товщиною b , м:

$$\begin{aligned} \text{– при виникненні тріщин у цегляних стінах:} \quad a &= \frac{0,6}{\sqrt{b}}; \\ \text{– при наскрізних проломах у цегляних стінах:} \quad a &= \frac{0,4}{\sqrt{b}}; \\ \text{– при наскрізних проломах у бетонних стінах:} \quad a &= \frac{0,25}{\sqrt{b}}; \\ \text{– при наскрізних проломах у залізобетонних стінах:} \quad a &= \frac{0,2}{\sqrt{b}}. \end{aligned}$$

ПРИКЛАД 12-А.

Визначити надмірний тиск та ступінь руйнування цегляної будівлі з залізобетонним перекриттям при вибуху на відстані 10 м від неї на ґрунті заряду гексогену масою 10 кг.

1. Визначення тротилового еквівалента M_T :

$$M_T = 2\eta K_{ef} C = 2 \cdot 0,6 \cdot 1,3 \cdot 10 = 15,6 \text{ кг}$$

2. Визначення приведенного радіусу вибуху R_{np} :

$$R_{np} = r/\sqrt[3]{M_T} = 10/\sqrt[3]{15,6} = 4$$

3. Визначення надмірного тиску ΔP_Φ :

$$\Delta P_\Phi = \frac{84}{R_{np}} + \frac{270}{R_{np}^2} + \frac{700}{R_{np}^3} = \frac{84}{4} + \frac{270}{4^2} + \frac{700}{4^3} = 48,8 \text{ кПа}$$

4. За додатком 42, зменшуючи розраховане значення ΔP_Φ □□ в 1,5 рази, можна зробити висновок, що будівля одержить середні руйнування.

3. Вплив сейсмічного ефекту вибуху.

Розрахунок конструкцій заглиблених споруд на вплив вибухової хвилі проводять по емпіричній формулі:

$$q = k_m k_h \frac{C^{\frac{2}{3}}}{r^2} \omega f(\beta), \quad (12.19)$$

де k_m , k_h , $f(\beta)$ – коефіцієнти; C – маса заряду тротилу, кг; r – відстань від центру вибуху до перешкоди, м; ω – частота власних коливань перешкоди, 1/с.

Вплив сейсмічного ефекту вибуху на заглиблені частини будівель та споруд визначають за формулою:

$$R_c = a_c K_c \sqrt[3]{C}, \quad (12.20)$$

де R_c – радіус сейсмічно небезпечної зони, м; a_c – коефіцієнт пропорційності, величина якого залежить від показника дії вибуху (див. додаток 39); K_c – коефіцієнт, величина якого залежить від

властивостей ґрунту в основі фундаментів будівель та споруд (див. додаток 40); C – загальна маса заряду ВР.

При вибухах в умовах міської забудови характер розповсюдження ударної хвилі істотно змінюється із-за її багатократного віддзеркалення і екранування стінами будівель. З цих же причин звичайно використовувані для розрахунку значень ΔP формули, у тому числі і розглянуті вище, непридатні.

Для оцінки ступеня пошкодження або руйнування будівель в місті використовується формула:

$$r = \frac{K_p \sqrt[3]{M_T}}{\sqrt[6]{1 + \left(\frac{3180}{M_T}\right)^2}}, \quad (12.21)$$

де: r – відстань від місця вибуху в метрах; M_T – тротиловий еквівалент заряду в кілограмах; K_p – коефіцієнт, відповідний різним ступеням руйнування:

$K_p < 5,6$ – повне руйнування будівель;

$K_p = 5,6 \dots 9,6$ – сильні руйнування будівлі (будівля підлягає зносу);

$K_p = 9,6 \dots 28$ – середні руйнування (можливо відновлення будівлі);

$K_p = 28 \dots 56$ – руйнування внутрішніх перегородок, дверних і віконних отворів;

$K_p = 56$ – руйнування 90% скління.

ПРИКЛАД 12-Б.

Визначити для умов міської забудови відстань, починаючи з якої будівлі одержать сильні руйнування при вибуху заряду 500 кг гексогена.

1. Визначення тротилового еквівалента:

$$M_T = K_{rf} C = 1.3 \cdot 500 = 650 \text{ кг}$$

2. Визначення шуканої відстані:

$$r = K_p \sqrt[3]{M_T} / \sqrt[6]{1 + (3180 / M_T)^2} = 9.6 \sqrt[3]{650} / \sqrt[6]{1 + (3180 / 650)^2} = 48.6 \text{ м.}$$

3.2 Розрахунок параметрів ударної хвилі при вибуху газоповітряних сумішей

При вибуху газоповітряної суміші (ГПС) утворюється *осередок вибуху*, ударні хвилі якого здатні викликати вельми великі руйнування на будівельних об'єктах.

У наземному вибуху ГПС прийнято виділяти три півсферичні зони у надземному просторі (рис. 12.6) та зону сейсмічного ефекту вибуху. Будівлі та споруди можуть зазнати пошкоджень від:

- 1) детонаційної хвилі;
- 2) розльоту осколків та продуктів вибуху;
- 3) впливу ударної хвилі;
- 4) сейсмічного ефекту вибуху.

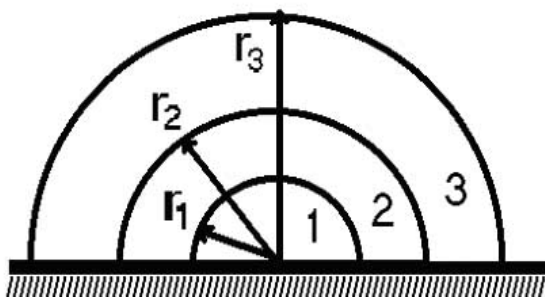


Рисунок 12.6 – Зони осередку вибуху ВР:

- 1 - зона детонаційної хвилі, r_1 ;
- 2 - дії продуктів вибуху, r_2 ;
- 3 - повітряної вибухової хвилі, r_3 .

1. Вплив детонаційної хвилі.

Зону детонаційної хвилі (зона 1) можна розглядати в межах газової хмари вибуху, де $r < r_1$.

При вибухах газоповітряних сумішей параметри усередині газової хмари можуть змінюватися в дуже широких межах залежно від умов вибуху, концентрації горючої компоненти і характеру вибухового горіння, які при прогнозуванні вибухів, особливо на відкритому повітрі, врахувати практично неможливо. Тому звичайно розрахунки проводять для гіршого випадку, при якому руйнівні наслідки вибуху найбільші.

Таким якнайгіршим випадком є детонаційне горіння суміші стехіометричного складу. Швидкість розповсюдження процесу детонаційного горіння усередині хмари дуже велика і перевищує швидкість звуку. Проте для проведення наближеної оцінки параметрів вибуху можна умовно прийняти, що хмара має форму півсфери з центром на поверхні землі, вибух ГПС відбувається миттєво і тиск в процесі вибуху однаково і постійно в усіх точках, що знаходяться усередині хмари.

Для більшості вуглеводневих газових сумішей стехіометричного складу можна прийняти, що тиск усередині газової хмари складає 1700 кПа.

Якщо вибухонебезпечна суміш стехіометричної концентрації знаходиться в замкнутому об'ємі, то при згорянні суміші її тиск порівняно з початковим збільшиться. Цей процес описується формулою:

$$\frac{P_B}{P_{\Pi}} = \frac{T_B \sum n_{\Pi\Gamma}}{T_{\Pi} \sum n_{\Pi}}, \quad (12.22)$$

де: P_{Π} – початковий тиск суміші до горіння, Па; P_B – тиск продуктів згорання після реакції, Па; T_B – температура продуктів горіння під час вибуху, К; T_{Π} – початкова температура суміші, К; $\sum n_{\Pi}$ – початкова кількість молей суміші до горіння; $\sum n_{\Pi\Gamma}$ – число молей продуктів згорання, що утворились в результаті реакції. Величини $\sum n_n$ та $\sum n_{\Pi\Gamma}$ визначаються з реакції горіння.

Враховуючи об'єднаний закон газового стану, рівняння (12.22) можна подати у вигляді:

$$\frac{V_B}{V_{\Pi}} = \frac{T_B \sum n_{\Pi\Gamma}}{T_{\Pi} \sum n_{\Pi}}; \quad V_B = \frac{T_B \sum n_{\Pi\Gamma}}{T_{\Pi} \sum n_{\Pi}} V_{\Pi}, \quad (12.23)$$

де V_{Π} – початковий об'єм суміші до горіння; V_B – об'єм продуктів вибуху.

Тобто, якщо початковий об'єм прийняти за одиницю, тоді при вибуху об'єм продуктів горіння буде перевищувати початковий у

$$V_B = \frac{T_B \sum n_{\Pi\Gamma}}{T_{\Pi} \sum n_{\Pi}} \quad \text{разів.} \quad (12.24)$$

Іншими словами *ступінь розширення* продуктів горіння ε при вибуху можна виразити:

$$\frac{T_B \sum n_{\Pi\Gamma}}{T_{\Pi} \sum n_{\Pi}} = \varepsilon. \quad (12.25)$$

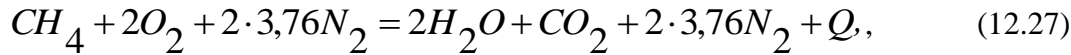
Відомо, що максимально можливий надмірний тиск в замкнутому об'ємі буде при $V_{\text{сум}} = V_{np}$, де $V_{\text{сум}}$ – об'єм вибухонебезпечної суміші при стехіометричній концентрації, а V_{np} – об'єм приміщення.

Його можна визначити за формулою:

$$\Delta P_B = P_{\Pi} \left(\frac{T_B \sum n_{\Pi\Gamma}}{T_{\Pi} \sum n_{\Pi}} - 1 \right) \frac{V_{\text{сум}}}{V_{\text{нр}}}, \quad \text{Па}, \quad (12.26)$$

де: P_{Π} – початковий тиск в приміщенні, Па; $\sum n_{\Pi\Gamma}$, $\sum n_{\Pi}$ – кількість молей продуктів горіння та початкової суміші, моль; T_B , T_{Π} – температура вибуху та початкова температура, К.

Наприклад, при горінні метану:



$$\Delta P_B = 10^5 \left(\frac{10,52 \cdot (2235 + 273)}{10,52 \cdot (20 + 273)} - 1 \right) = 7,56 \cdot 10^5, \text{ Па}$$

У реальній ситуації необхідно враховувати додаткові чинники, які впливають на процес вибуху, наприклад, участь пальної речовини у дефлаграційному процесі, її густину при різних температурах, нещільність об'єму приміщення, тощо. Надмірний тиск вибуху ΔP для індивідуальних палих речовин, що складаються з атомів *C, H, O, N, Cl, Br, I, F*, визначається по формулі:

$$\Delta P = (P_{\text{max}} - P_0) \cdot \frac{m \cdot z}{V_{\text{св}} \cdot \rho_{\Pi\Gamma}} \cdot \frac{100}{C_{\text{ст}}} \cdot \frac{1}{K_H}, \quad (12.28)$$

де P_{max} – максимальний тиск вибуху стехіометричної газоповітряної або пароповітряної суміші в замкнутому об'ємі, визначений експериментально або за довідковими даними. За відсутності даних допускається приймати $P_{\text{max}} = 900$ кПа;

P_0 – початковий тиск повітря до вибуху, кПа (допускається приймати рівним $P_0 = 101$ кПа);

m – маса горючого газу (ГГ) або пари легкозаймистих (ЛЗР) і горючих рідин (ГР), що вийшли в результаті аварії в приміщення, кг;

Z – коефіцієнт участі пального у вибуху, який може бути розрахований на основі характеру розподілу газів і пари в об'ємі приміщення згідно додатку. Для горючих газів (окрім водню) $Z = 1,0$;

$V_{\text{св}}$ – вільний об'єм приміщення, м³;

K_H – коефіцієнт, що враховує негерметичність приміщення і неадіабатичність процесу горіння. Допускається приймати $K_H = 3$;

$\rho_{\Pi\Gamma}$ – густина газу або пари при розрахунковій температурі t_p , кг·м⁻³, що обчислюється за формулою (наприклад, для ацетилену C_2H_2 $\rho_{\Pi\Gamma} = 1,079$ кг/м³);

$$\rho_{\Pi\Gamma} = \frac{M}{V_0 (1 + 0,00367 t_p)}, \quad (12.29)$$

де M – молярна маса, кг·кмоль⁻¹;

V_0 – молярний об'єм, $V_0 = 22,413$ м³·кмоль⁻¹;

t_p – розрахункова температура, °С. Як розрахункову температуру слід приймати максимально можливу температуру повітря в даному приміщенні у відповідній кліматичній зоні або максимально можливу температуру повітря за технологічним регламентом з урахуванням можливого підвищення температури в аварійній ситуації. Якщо такого значення розрахункової температури t_p з яких-небудь причин визначити не вдається, допускається приймати її рівній 61 °С;

$C_{\text{ст}}$ – стехіометрична концентрація ГГ або пари ЛЗР і ГР % (об.), обчислювана за формулою:

$$C_{\text{ст}} = 100 / (1 + 4,84 \cdot \beta), \quad (12.30)$$

де β – стехіометричний коефіцієнт кисню в реакції згорання:

$$\beta = n_c + \frac{n_H - n_x}{4} - \frac{n_O}{2}; \quad (12.31)$$

де n_C, n_H, n_O, n_X – число атомів C, H, O і галогенів в молекулі пального.

Розрахунок ΔP для індивідуальних речовин, окрім згаданих в (12.28), а також для сумішей може бути виконаний по формулі

$$\Delta P_\Phi = \frac{m Q P_0 Z}{V_{np} \rho_B c_B T_0 K_H} \quad (12.32)$$

де Q – теплота згорання речовини, Дж·кг⁻¹;

ρ_B – густина повітря до вибуху при початковій температурі T_0 , кг·м⁻³;

c_B – теплоємність повітря, Дж·кг⁻¹·К⁻¹ (допускається приймати $c_B = 1,01 \cdot 10^3$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹);

V_{np} – об'єм приміщення, м³;

T_0 – початкова температура повітря, К.

Ступінь пошкодження об'єкту (будівлі, споруди і т.п.) оцінюється по критерію оцінки фізичної стійкості (сильне, середнє, слабке), а об'єктів дії (устаткування, установок і т.п.) по критерію перекидання і зсуву. Критерієм оцінки фізичної стійкості будівельного об'єкту є надмірний тиск при вибуху ΔP_Φ , а критерієм оцінки за перекиданням і зсувом – швидкісний натиск вибуху $P_{ск}$.

$$P_{ск} = \frac{2,5 \cdot \Delta P_\Phi^2}{\Delta P_\Phi + 7 P_0}. \quad (12.33)$$

Розрахований швидкісний натиск вибуху порівнюється зі стійкістю об'єкту при перекиданні та з його опором до зсуву за формулами:

при перекиданні
$$P_{ск}^{опр} \geq \frac{a}{b} \frac{G}{\xi_x S}, \quad (12.34)$$

при зсуві
$$P_{ск}^{см} \geq \frac{fG}{\xi_x S}, \quad (12.35)$$

де a – висота об'єкту, м; b – ширина об'єкту, м; G – вага об'єкту, Н; C_x – коефіцієнт опору; S – площа поперечного перетину, м²; f – коефіцієнт тертя; G – вага об'єкту, Н; ξ_x – коефіцієнт опору; S – площа поперечного перетину, м².

ПРИКЛАД 12-Б.

Оцінити ступінь пошкодження приміщення в цегляній безкаркасній будівлі з залізобетонним перекриттям при вибуху в ньому газоповітряної суміші та швидкісний натиск вибуху при перекиданні устаткування за умовами:

- маса суміші $m = 2$ кг; – теплота згорання суміші $Q = 40 \cdot 10^3$ Дж·кг⁻¹; – коефіцієнт участі пальної суміші у вибуху $Z = 0,5$;
- початкова температура повітря $T_0 = 300$ К; – густина повітря до вибуху $\rho_B = 1,29$ кг·м⁻³; – теплоємність повітря $c_B = 1,01 \cdot 10^3$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹; $P_0 = 101$ кПа;
- об'єм приміщення $V_{np} = 100$ м³; – коефіцієнт негерметичності і неадіабатичності $K_H = 3$;
- параметри устаткування: $a=3$ м; $b=2$ м; $G=20$ кН; $C_x=0,8$; $S=6$ м².

1. Визначення надмірного тиску при вибуху газоповітряної суміші:

$$\Delta P_{\Phi} = \frac{m Q P_0 Z}{V_{\Pi} \rho_B c_B T_0 K_H} = \frac{2 \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 101 \cdot 0,5}{100 \cdot 1,29 \cdot 1,01 \cdot 10^3 \cdot 300 \cdot 3} = 34,44 \text{ кПа}.$$

За розрахунком згідно додатку 41 очікується середня ступінь пошкодження приміщення.

2. Визначення швидкісного натиску вибуху:

$$P_{CK} = \frac{2,5 \cdot \Delta P_{\Phi}^2}{\Delta P_{\Phi} + 7 P_0} = \frac{2,5 \cdot 34,44^2}{34,44 + 7 \cdot 101} = 3,999 \text{ кПа};$$

$$P_{CK}^{opr} = \frac{a}{\nu} \frac{G}{\xi_x S} = \frac{3 \cdot 20}{2 \cdot 0,8 \cdot 6} = 6,25 \text{ кПа}$$

Необхідний тиск при перекиданні перевищує швидкісний натиск вибуху, тому устаткування не перекинеться.

Тротиловий еквівалент газоповітряних сумішей M_T (кг) визначається із співвідношення (12.5), в якому $K_{ef} = Q/Q_T$ та $\eta = 1$, тобто в припущенні, що енергія вибуху півсферичної хмари повністю відбита поверхнею, над якою ця хмара утворилася. З урахуванням викладеного:

$$M_T = 2 C_B \frac{Q}{Q_T}, \quad (12.36)$$

де: C_B – маса речовини, що вибухає у складі хмари ГПС (кг); Q – теплота, що виділяється при згоранні даної речовини (кДж/кг); Q_T – теплота вибуху тротилу (4520 кДж/кг).

Q є табличною величиною (додаток 44), яка показує кількість енергії, що виділяється при вибуху (згоранні) одиниці маси даної речовини.

Значення C_B визначається співвідношенням

$$C_B = \delta M_{XP}, \quad (12.37)$$

де: M_{XP} – маса речовини, що знаходилася в об'ємі до аварії (до вибуху), кг;

δ – коефіцієнт, залежний від способу зберігання речовини, що показує частку речовини, перехідну при аварії в газ:

$\delta = 1$ – для газів при атмосферному тиску;

$\delta = 0,5 \dots 0,6$ – для зріджених газів, що зберігаються під тиском;

$\delta = 0,1$ □ – для зріджених газів, що зберігаються ізотермічно;

$\delta = 0,02 \dots 0,07$ □ – для розлитих ЛЗР.

Об'єм газової хмари V_0 та розмір півсфери газової хмари r_1 (рис. 12.6, зона I) залежать від кількості початкової речовини, що знаходилася в сховищі до аварії, і способу його зберігання. Визначення цих параметрів може бути виконано по формулах:

$$V_0 = \frac{V_a \delta M_{XP}}{\mu c_{ctx}}, \text{ м}^3; \quad r_1 = \sqrt[3]{\frac{3 V_a \delta M_{XT}}{2 \pi \mu c_{ctx}}} = 2,2 \sqrt[3]{\frac{\delta M_{XT}}{\mu c_{ctx}}}, \text{ м}; \quad (12.38)$$

де: V_a – об'єм кіломоля ідеального газу (постійна Авогадро: $V_a = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$); μ – молярна маса речовини, що зберігається (кг/кмоль); c_{ctx} – стехіометрична об'ємна концентрація (у абсолютних долях).

Радіус зони детонаційної хвилі r_1 , м, для найбільш часто використовуваних вуглеводнів можна приблизно розраховувати за емпіричною формулою:

$$r_1 = 17,5 \times \sqrt[3]{\delta \cdot M_{xp}} . \quad (12.39)$$

2. Вплив розльоту продуктів вибуху.

Радіус зони дії продуктів вибуху ГПС, які здатні пошкодити будівельні об'єкти r_2 , м, розраховують за емпіричною формулою:

$$r_2 = 1,7 \times r_1 . \quad (12.40)$$

3. Вплив вибухових хвиль на відстанях $r > r_1$.

Формули для визначення значень параметрів ударної хвилі на відстанях, що перевищують радіус півсфери газової хмари в навколишньому повітрі, одержані шляхом апроксимації чисельного рішення задачі про детонацію пропаноповітряної суміші. Спосіб розрахунку параметрів ударної хвилі для горючих сумішей різних вуглеводнів з повітрям, що задовільно узгоджуються з експериментальними даними, отримано з рішення системи нестационарних рівнянь газової динаміки.

Максимальний надмірний тиск у фронті ударної хвилі ΔP_ϕ (кПа):

$$\Delta P_\phi = P_0 \cdot P_{np} ; \quad (12.41)$$

$$\lg P_{np} = 0.65 - 2.18 \lg R_{np} + 0.52 (\lg R_{np})^2 ; \quad R_{np} = r / \sqrt[3]{M_T} , \quad (12.42)$$

де: M_T – тротиловий еквівалент наземного вибуху півсферичної хмари ГПС (кг); P_0 – атмосферний тиск, $P_0 = 101$ кПа.

Питомий імпульс I , Па·с:

$$I = I_{np} \sqrt[3]{M_T} ; \quad (12.43)$$

$$\lg I_{np} = 2.11 - 0.97 \lg R_{np} + 0.44 (\lg R_{np})^2 . \quad (12.44)$$

Приклад 12-В.

Визначити надмірний тиск і питомий імпульс у фронті ПУХ на відстані 100 м. від місткості, в якій знаходиться 10 т пропана, що зберігається в рідкому вигляді під тиском, при її розгерметизації і вибуху утвореної ГПС.

1. Визначення маси пропану у складі ГПС

$$C_B = \delta M_{xp} = 0,5 \cdot 10000 = 5000 \text{ кг}.$$

2. Визначення тротилового еквівалента

$$M_T = 2C_e Q/Q_T = 2 \cdot 5000 \cdot \frac{46,4}{4,52} = 102655 \text{ кг} .$$

3. Визначення приведенного радіусу вибуху

$$R_{np} = r / \sqrt[3]{M_T} = 100 / \sqrt[3]{102655} = 2,14 .$$

4. Визначення надмірного тиску у фронті ударної хвилі

$$\lg P_{np} = 0,65 - 2,18 \lg R_{np} + 0,52 (\lg R_{np})^2 = 0,65 - 2,18 \cdot \lg 2,14 + 0,52 \cdot (\lg 2,14)^2 = -0,0135,$$

$$\text{звідки } P_{np} = 10^{-0,0135} = 0,97, \text{ отже}$$

$$\Delta P_{\Phi} = P_0 \cdot P_{np} = 100 \cdot 0,97 = 97 \text{ кПа.}$$

5. Визначення значення питомого імпульсу ударної хвилі

$$\lg I_{np} = 2,11 - 0,97 \lg R_{np} + 0,44 (\lg R_{np})^2 = 2,11 - 0,97 \lg 2,14 + 0,44 (\lg 2,14)^2 = 1,84,$$

$$\text{звідки } I_{np} = 10^{1,84} = 69,2;$$

$$I = I_{np} \sqrt[3]{M_T} = 69,2 \sqrt[3]{102655} = 3240 \text{ Па}\cdot\text{с.}$$

Параметри повітряної ударної хвилі поза межами газової хмари (у зоні 3) залежать від потужності вибуху. За законом подібності надмірний тиск в цій зоні для найбільш часто використовуваних вуглеводнів можна визначити з достатнім наближенням через відносний коефіцієнт ψ_I , використовуючи емпіричні розрахункові формули:

$$\psi_I = 0,24 \times \frac{r_3}{r_1}, \quad (12.45)$$

$$\text{при } \psi \leq 2 \quad \Delta P_{III} = \frac{700}{3 \times \left(\sqrt{1 + 29,8 \times \psi^3} - 1 \right)}, \quad (12.46)$$

$$\text{при } \psi > 2 \quad \Delta P_{III} = \frac{22}{\psi \times \sqrt{\lg \psi + 0,158}}. \quad (12.47)$$

де r_3 – відстань від місця вибуху до точки в зоні 3; ΔP_{III} – надмірний тиск вибухової хвилі на відстані r_3 .

ПРИКЛАД 12-Г.

Визначити небезпечні зони при вибуху місткості, в якій міститься 100 т зрідженого бутан-пропана та оцінити характер руйнувань промислової будівлі з металевим каркасом на відстані 500 м від місця вибуху. Коефіцієнт переходу рідкого продукту в ГПС $K_H=1$.

1. Визначення радіусу зони детонаційної хвилі (зони 1):

$$r_1 = 17,5 \times \sqrt[3]{C \times K_H} = 17,5 \times \sqrt[3]{100 \times 1} = 81,21 \text{ м.}$$

2. Визначення радіусу зони дії продуктів вибуху (зона 2):

$$r_2 = 1,7 \times r_1 = 1,7 \times 81,21 = 138,06 \text{ м.}$$

3. Визначення надмірного тиску вибухової хвилі на відстані 500 м від місця вибуху:

$$\psi_I = 0,24 \times \frac{r_3}{r_1} = 0,24 \times \frac{500}{81,21} = 1,47.$$

$$\text{Оскільки } \psi \leq 2 \quad \Delta P_{III} = \frac{700}{3 \times \left(\sqrt{1 + 29,8 \times \psi^3} - 1 \right)} = \frac{700}{3 \times \left(\sqrt{1 + 29,8 \times 1,47^3} - 1 \right)} = 26,57 \text{ кПа.}$$

Згідно додатку 41 можна очікувати слабких пошкоджень промислової будівлі з металевим каркасом на відстані 500 м від місця вибуху.

Для пилоповітряних сумішей вугільного пилу $P_B = (4...5) \cdot 10^5$ Па. Навантаження на огорожувальні конструкції, що виникає під час вибуху, досягає сотень кілопаскалей. Допустимий надмірний тиск для конструкцій приймається набагато меншим (див. додаток 41). Таким чином, для зменшення тиску на будівельні конструкції необхідно застосувати відповідні заходи, наприклад, забезпечити швидке зниження тиску на них після вибуху.

Під час вибуху газоповітряної суміші всередині приміщення зміну тиску в ньому можна охарактеризувати графіком на рис. 12.7, на якому продемонстровано зменшення тиску вибуху в закритому приміщенні при застосуванні ЛСК.

Оскільки конструкції приміщення мають власну міцність, яка дозволяє витримувати певний тиск, то надмірний об'єм продуктів вибуху, який потрібно видалити із приміщення для недопущення його пошкодження, можна визначити за формулою:

$$\Delta V_B = V_B - V_{\Pi} \frac{P_{\text{доп}}}{P_{\Pi}}, \quad (12.48)$$

де: $P_{\text{доп}}$ – допустимий тиск на конструкції приміщення, Па.

Швидкість витікання та витрати газу при адіабатичному стисканні залежать від відношення тиску в середовищі, в яке витікає газ P_a , до тиску в замкненому приміщенні P_{Π} , де відбулася реакція.

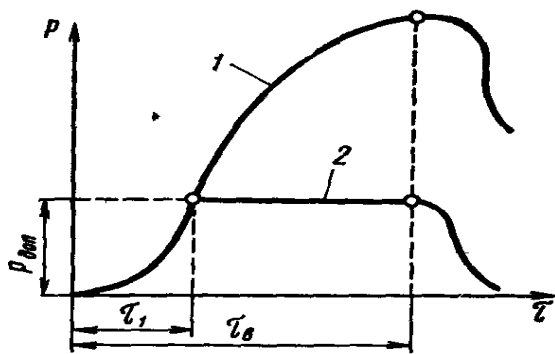


Рисунок 12.7 – Схема зміни тиску при вибуху

1– крива зміни тиску в закритому приміщенні;

2 – крива зміни тиску в будинку з вибуховими отворами (ЛСК)

Відношення $P_a/P_{\text{доп}}$, при якому витрати газу стають максимальними, при незруйнованому об'ємі приміщення називається критичним і позначається $\nu_{кр}$.

Для двоатомних газів $\nu_{кр} = 0,528$. Тобто для будь-яких значень має зберігатися нерівняння $P_a/P_{\text{доп}} > 0,528$. Це означає, наприклад, що при $P_a = 1 \cdot 10^5$ Па, $P_{\text{доп}}$ буде знаходитися в межах $1,15 \cdot 10^5 \dots 1,5 \cdot 10^5$ Па. Для цього випадку розрахункова формула для визначення швидкості витікання v має наступний вид:

$$v = \varphi \sqrt{2g \frac{\kappa}{\kappa - 1} P_{\text{доп}} V_t \left[1 - \left(\frac{P_a}{P_{\text{доп}}} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]}, \quad (12.49)$$

де g – прискорення сили ваги, м/с²;

V_t – питомий об'єм продуктів горіння з урахуванням температури, м³/Н;

φ – коефіцієнт витрати;

P_a – тиск середовища, в яке відбувається витікання, Н/м²;

k – показник адіабати для двоатомних газів (відношення питомої теплоємності при $P=const$ до питомої теплоємності при $V=const$). Для розрахунків показника адіабати k виходять з наступних значень молярної теплоємності газів:

- одноатомний газ $\mu c_v = 12,6$ кДж/моль·град;
- двоатомний газ $\mu c_v = 21$ кДж/моль·град;
- трьох- і багатоатомний газ $\mu c_v = 29,4$ кДж/моль·град.

Між молярними теплоємностями ідеальних газів при $P=const$ і $v=const$ існує залежність $\mu c_p - \mu c_v = 8,4$ кДж/моль·град. Таким чином, μc_p для двоатомних газів, до числа яких відносяться продукти згоряння, буде дорівнювати 29,4 кДж/моль·град. Для цих умов:

$$k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{29,4}{21,0} = 1,4. \quad (12.50)$$

Якщо підставити у формулу (12.49) значення питомого об'єму газу V_t з урахуванням поправки на температуру:

$$V_t = \frac{1}{\rho_0} \frac{T_{\Pi\Gamma}}{T_0} \frac{P_a}{P_{\partial on}}, \quad (12.51)$$

де ρ_0 – питома вага продуктів згоряння при 0 °С, Н/м³; $T_{\Pi\Gamma}$ – температура згоряння при вибуху, К; T_0 – початкова температура продуктів згоряння, К.

Тоді в перетвореному виді формула (12.49) матиме вигляд:

$$v = \varphi \sqrt{2g \frac{\kappa}{\kappa-1} P_{\Pi} \frac{T_{\Pi\Gamma}}{\rho_0 T_0} \left[1 - \left(\frac{P_a}{P_{\partial on}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}. \quad (12.52)$$

Якщо у формулу (12.52) підставити значення $\varphi=0,75$, $g=9,81$ м/с², $k=1,4$, $P_a=10^5$ Н/м², $T_0=273$ К, $\gamma_0=12,93$ Н/м³, то в остаточному виді:

$$v = 33,5 \sqrt{T_{\Pi\Gamma} \left[1 - \left(\frac{P_a}{P_{\partial on}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}. \quad (12.53)$$

Для недопущення пошкодження приміщення, в якому стався вибух, треба, щоб продукти вибуху мали змогу витікати назовні через прорізи. Площа вибухових прорізів відповідає вимогам безпеки при дотриманні двох умов:

$$\Delta V_g = \Delta V_i; \quad (12.54)$$

$$\left| \frac{dP}{d\tau} \right|_B = \left| \frac{dP}{d\tau} \right|_u, \quad (12.55)$$

де ΔV_g — надлишковий об'єм продуктів згоряння, що утворилися при вибуху, м³;

ΔV_i — витрата продуктів згоряння при витіканні через вибуховий проріз, м³;

$\left| \frac{dP}{d\tau} \right|_B$ швидкість зміни тиску при вибуху, Н/м, с;

$\left| \frac{dP}{d\tau} \right|_u$ швидкість зміни тиску при витіканні, Н/м, с.

З рівняння нерозривності відомо, що

$$\Delta V_i = f_{e.n} v \tau_e, \quad (12.56)$$

де $f_{BП}$ – площа вибухових прорізів, м²; v – швидкість витікання продуктів згоряння, м/с; τ_B – час вибуху, с.

З формули (12.56) витікає:

$$f_{e.n} = \frac{\Delta V_B}{v \tau_e}. \quad (12.57)$$

З формул (12.53) і (12.57) в остаточному виді знаходиться площа вибухових прорізів $f_{BП}$:

$$f_{BП} = \frac{\Delta V_B}{33,5 \tau_B \sqrt{T_{ПГ} \left[1 - \left(\frac{P_a}{P_{дон}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}}. \quad (12.58)$$

З формули (12.57) видно, що між припустимими тиском на конструкції і площею вибухових прорізів існує зв'язок. Чим міцніше конструкція, тим менше може бути площа вибухових прорізів. Попередні розрахунки, а також аналіз вибухів показують, що при площі вибухових прорізів, що рекомендується нормами і дорівнює 0,05 м²/м³, тиск при вибуху може значно перевищити припустимий і зруйнувати будівельні конструкції. Виходячи з цього нормами рекомендується визначати площу вибухових прорізів розрахунком.

У випадку, коли $P_{дон} = 1,5 \cdot 10^4$ Н/м².

$$f_{BП} = \frac{\Delta V_B}{6,7 \tau_B \sqrt{T_{ПГ}}}. \quad (12.59)$$

Залежність площі вибухових прорізів від різних факторів представлена на рис. 12.8. Графіками цього малюнка можна користатися для визначення площі прорізів. Для цього потрібно знати надлишковий об'єм продуктів горіння при вибуху, припустимий тиск на конструкції і температуру горіння при вибуху.

Легкоскидна конструкція розкривається миттєво при досягненні в приміщенні тиску, що дорівнює $P_{дон}$. При цьому зміна тиску в будинку з легкоскидними конструкціями характеризується схемою, яка наведена на рис. 1.

Противибуховий захист повинен створити такі умови, щоб тиск під час вибуху не перевищував допустимий.

Іншими словами, конструктивні елементи будівель та споруд повинні забезпечувати зниження тиску під час вибуху в замкнутому просторі до величини, яка є безпечною.

Якщо рішення противибухового захисту забезпечують зниження тиску під час вибуху до 5 кПа, то перевірка несучої здатності основних конструкцій не потрібна.

У протилежному випадку необхідно виконати розрахунок вибухостійкості конструкцій і, в разі потреби, передбачати їх зміцнення.

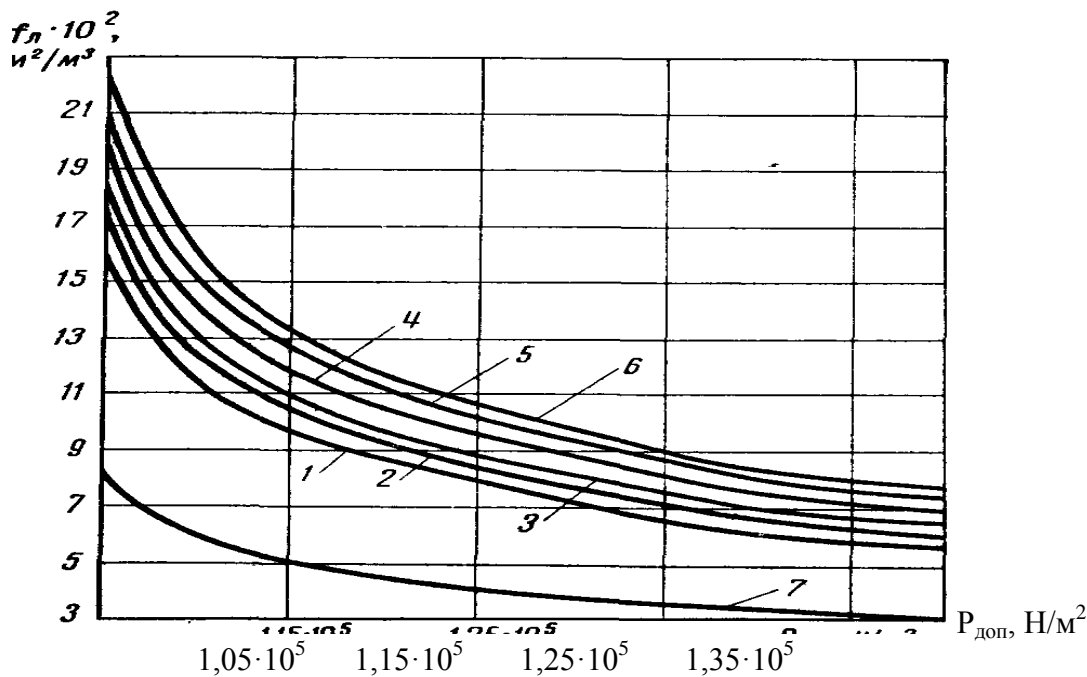


Рисунок 12.8 – Графік визначення площі вибухових прорізів у залежності від тиску, що допускається, на будівельні конструкції

1 - $T_B=2073$ К; $\Delta V_B=5,6...6,05$ м³/м³; 2 - $T_B=2273$ К; $\Delta V_B=6,3...6,75$ м³/м³; 3 - $T_B=2473$ К; $\Delta V_B=6,95...7,4$ м³/м³; 4 - $T_B=2773$ К; $\Delta V_B=8...8,45$ м³/м³; 5 - $T_B=3073$ К; $\Delta V_B=9...9,45$ м³/м³; 6 - $T_B=3273$ К; $\Delta V_B=9,6...10,05$ м³/м³; 7 - $\Delta V_B=5$ м³/м³;

Вибух, як один з вторинних проявів небезпечних факторів пожежі, приводить до руйнування будівель та споруд і нерідко супроводжується загибеллю людей. Противибуховий захист будівель та споруд повинен здійснюватися на стадії проектування.

Дослідженнями встановлено, що фронт полум'я має форму сфери, всередині якої знаходяться продукти горіння, а поза неї незгорівша суміш. Сферичний фронт полум'я зберігається до моменту торкання ним стінок приміщення.

Розміщення джерела запалювання в суміші суттєво не впливає на величину надмірного тиску, але впливає на час вибуху. При розрахунку часу вибуху робиться припущення, що джерело запалювання розміщується в геометричному центрі вибухонебезпечного об'єму. Це найгірший випадок, тому що проходить найбільше зростання тиску.

Різке підвищення тиску до небезпечного для конструкцій при вибуху починається з моменту досягнення фронтом полум'я 0,4-0,5 R. Іншими словами, мить досягнення максимального тиску фіксується, як мить досягнення фронтом полум'я стінок приміщення.

Таким чином, час вибуху (розрахунковий) може бути визначений як час переміщення фронту полум'я від центру сфери до стінки приміщення. Фронт полум'я проходить відстань 0,5r.

$$\tau_B = \frac{0,5r}{v_n \varepsilon}, \quad (12.60)$$

де: v_n – швидкість розповсюдження полум'я, м/с.

Розрізняють *нормальну швидкість розповсюдження полум'я v_n* , яка менша від тієї, що спостерігається, на ступінь розширення продуктів згоряння при вибуху ε . Вона залежить від складу суміші, тиску та температури. Розповсюдження полум'я йде тільки за рахунок теплопередачі.

Враховуючи вираз радіуса сфери через об'єм

$$r = \sqrt[3]{\frac{3V_{\text{сум}}}{4\pi}}$$

і те, що об'єм вибухонебезпечної суміші $V_{\text{сум}}$ рівняється об'єму приміщення $V_{\text{пр}}$, можна розрахувати час вибуху:

$$\tau_B = \frac{0,5}{v_n \varepsilon} \sqrt[3]{\frac{3V_n}{4\pi}}. \quad (12.61)$$

Дані величин v_n та ε дуже обмежені.

Для розрахунків на практиці рекомендують час вибуху приймати:

- для газоповітряної суміші – 0,1 с;
- для пароповітряної суміші – 0,2 с;
- для пилоповітряної суміші – 0,3 с.

3.3 Розрахунок площі легкоскидних конструкцій

Питання противибухового захисту будівель та споруд висвітлюються у СНиП 2.09.02-85. Производственные здания. (п.2.42.)

В приміщеннях категорії А і Б слід передбачати зовнішні легкоскидні огорожуючі конструкції. Площа ЛСК визначається розрахунком.

Зниження тиску під час вибуху досягається за рахунок випуску продуктів вибуху та вибухонебезпечної суміші, яка не вступила в реакцію, через отвори, які звільнили ЛСК, що відкрилися або зруйнувалися.

Площа ЛСК, відповідно до СНиП 2.09.02-85, визначається розрахунком.

При цьому приймаються припущення:

- вибухонебезпечна суміш розподілена по всьому об'єму приміщення або його частини;
- концентрація суміші близька до стехіометричної;
- горіння суміші розповсюджується по сфері;
- ЛСК руйнуються миттєво при досягненні в приміщенні допустимого надмірного тиску ΔP_d ;
- процес витікання газів через отвори розглядається як адіабатичний.

Прийняті допущення добре сходяться з експериментальними даними.

Якщо відсутні розрахункові дані, площа ЛСК приймається не менше $0,05 \text{ м}^2$ на 1 м^3 об'єму приміщення категорії А і не менше $0,03 \text{ м}^2$ на 1 м^3 об'єму приміщення категорії Б.

Загальна методика розрахунку площі легкоскидних конструкцій.

1. Загальна площа отворів ЛСК.

Загальна площа отворів ЛСК, які відчиняються, $F_{\text{ВП}}$ визначається за формулою:

$$F_{\text{ВП}} = f_{\text{ВП}} V_{\text{П}}, \quad (12.62)$$

де: $f_{\text{ВП}}$ – питома площа перерізу ЛСК, $\text{м}^2/\text{м}^3$; $V_{\text{П}}$ – об'єм приміщення, м^3 .

2. Питома площа перерізу ЛСК.

Питома площа перерізу ЛСК визначається із рівняння нерозривності:

$$f_{\text{ВП}} = \frac{\Delta V_B}{v_B \tau_B}, \quad (12.63)$$

де: ΔV_B – надмірний об'єм продуктів горіння, які утворилися під час вибуху, $\text{м}^3/\text{м}^3$; v_B – швидкість витікання продуктів горіння, $\text{м}/\text{с}$; τ_B – час вибуху, с.

Для визначення площі вибухових прорізів у приміщеннях з неповною загазованістю $f_{\text{ВП}}^{\text{нп}}$ розглянемо два випадки. Неповна загазованість по висоті приміщення і неповна загазованість по площі приміщення. У першому випадку приймається рівномірний розподіл вибухонебезпечної суміші по всій площі підлоги на частину висоти приміщення, а в другому випадку приймається рівномірна загазованість по усій висоті приміщення, але на обмеженій площі.

Відношення питомої площі вибухових прорізів за неповної загазованості f_{en}^{nn} до питомої площі вибухових прорізів за повної загазованості f_{en}^n . Враховуючи, що допустимий тиск на конструкції $P_{дон}$ за неповної і повної загазованості однаковий, а також, що $\Delta V_{\epsilon}^{nn} = \Delta V_{\epsilon}^n$, одержимо для першого випадку загазованості:

$$\frac{f_{en}^{nn}}{f_{en}^n} = \frac{\Delta V_{\epsilon}^{nn} \tau_{\epsilon}^n v^n}{\tau_{\epsilon}^{nn} v^{nn} \Delta V_{\epsilon}^n} = \frac{\tau_{\epsilon}^n}{\tau_{\epsilon}^{nn}} = \sqrt[3]{\frac{V^n}{V^{nn}}}, \quad (12.64)$$

звідки

$$f_{en}^{nn} = f_{en}^n \sqrt[3]{\frac{V^n}{V^{nn}}}, \quad (12.65)$$

де індекси НП і П позначають відповідно неповну і повну загазованість.

Для другого випадку загазованості питому площу вибухових отворів визначають як для випадку повної загазованості приміщень, однак загальну площу вибухових отворів визначають у залежності від об'єму вибухонебезпечних ділянок.

Питання для самоконтролю

1. Що таке вибух? Що таке вибухова хвиля?
2. Охарактеризуйте види вибухових хвиль.
3. Назвіть параметри вибухових хвиль. Від чого вони залежать?
4. Що таке швидкісний натиск?
5. Що таке тротиловий еквівалент?
6. Охарактеризуйте детонаційний вибух.
7. Охарактеризуйте дефлаграційний вибух.
8. У чому різниця між детонаційним та дефлаграційним вибухом?
9. Чим повинна забезпечуватися вибухобезпечність об'єкту?
10. Що таке вибухозахист?
11. Назвіть планувальні заходи щодо вибухопопередження.
12. Назвіть конструктивні заходи щодо вибухопопередження.
13. Чим характеризується вибухотривкість конструкцій?
14. Чим забезпечують вибухотривкість об'єкту при зовнішніх аварійних вибухах?
15. Наведіть принципи проектування вибухотривких будівель при загрозі зовнішніх аварійних вибухів.
16. Наведіть напрями забезпечення вибухозахисту будівель при загрозі внутрішніх аварійних вибухів.
17. Як забезпечують зниження надмірного тиску, що виникає при внутрішніх аварійних вибухах?
18. Наведіть приклади легкоскидних конструкцій.
19. Як під впливом динамічного навантаження руйнується балка з защемленими кінцями?
20. Як під впливом динамічного навантаження руйнується балка з шарнірно-обпертими кінцями?
21. Наведіть причини руйнування будівельних конструкцій при аварійних вибухах.
22. Наведіть особливості впливу вибухових хвиль на будівельні об'єкти.

23. За якими граничними станами розраховують конструкції при загрозі аварійних вибухів?
24. Наведіть вимоги до будівельних конструкцій вибухонебезпечних виробництв.
25. Охарактеризуйте особливості наземного вибуху.
26. Охарактеризуйте особливості розповсюдження вибухових хвиль при наземному вибуху.
27. Наведіть особливості зонування при вибуху конденсованої ВР.
28. Наведіть особливості зонування при вибуху газоповітряної суміші.

Методичну розробку склав:

ст. викладач

Ю.В.Квітковський