

УДК 539.3

Кобієв В.Г., канд. техн. наук

ОСОБЛИВОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ СПЕЦИФІКИ ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ НА ОБОЛОНКОВІ СИСТЕМИ ПРИ ІМПУЛЬСНИХ ДІЯХ ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ

Інтенсивний розвиток машинобудування, авіації, ракетобудування, будівництва та інших галузей народного господарства обумовлює глибоке вивчення динамічних процесів у різних конструкціях, широке коло яких представляють різноманітні оболонкові системи. Використання таких систем дозволяє вирішити проблему матеріалоемності при збереженні необхідної міцності та надійності конструкцій.

В останні роки поширений інтерес викликає питання міцності конструкцій під дією енергії вибуху та ударних повітряних хвиль. Особливо це стосується різних інженерних споруд та відповідальних елементів машинобудівних конструкцій. Імпульсні навантаження з високим рівнем енергії впливу викликають високошвидкісне деформування конструкцій і супроводжується, як правило, різними фазовими переходами від одного стану матеріалу до іншого. Це, у свою чергу, викликає потребу розв'язання нових нестационарних задач для оболонкових конструкцій.

Першим етапом розв'язання таких задач є оцінка зовнішніх сил, які виникають при вибуху або ударній хвилі. Зазвичай це імпульсні короткочасні навантаження локального та розподільного характеру. Їхня оцінка є виключно важливою бо у значній мірі визначає точність кінцевого розв'язку задачі. Застосування складного математичного апарату щодо опису поведінки конструкції не дає бажаного результату, якщо зовнішні сили визначені не достатньо точно.

При визначенні навантаження від різного роду вибухових джерел користуються експериментальними даними при їх наявності, у протилежному випадку навантаження оцінюються за допомогою розрахункових схем, що базуються на знанні проміжних фізичних явищ, супроводжуваних вибуховим процесом. Особливо це важко, коли енергія вибуху безпосередньо передається оболонці. У таких випадках по поверхні дії ударної хвилі у матеріалі конструкції виникають напруження набагато вищі границі пружності, хоч уся конструкція працює у пружній області, а розміри пластичної зони порівняні з товщиною перешкоди.

Як правило, вибухи утворюють короточасні навантаження, що діють або підвищуються до максимального значення за час, порівняний або менше часу пробігу пружної хвилі шляху, рівному характерному розміру системи. Навантаження, що розглядаються, характеризуються амплітудними значеннями тиску та напружень, а також формою прикладеного імпульсу. Вони можуть утворюватися простішими хвилями стиску або напружень, а також ударними хвилями з нескінченно крутим фронтом.

В цілому проблема визначення та опису вибухових навантажень досить широка та складна, що далеко виходить за рамки даного дослідження. Тому нижче наводяться тільки ті вирази для зовнішніх сил, які можуть бути використані для розв'язання конкретних задач [1], [2], [3].

Найбільш широкими елементами оболонкових систем є гладкі осесиметричні оболонки обертання та конструкції з них. Щодо навантаження, які на залежать від окружної координати, виникають найбільш прості просторово одномірні задачі. Але навіть для таких найбільш простих варіантів не існує єдиного підходу до розв'язання різноманітних за змістом нестационарних динамічних задач [2].

Розподіл тиску при дії ударної хвилі на оболонкову конструкцію у випадках, коли не треба враховувати впливу навколишнього середовища та взаємодії із продуктами детонації, можна описати наступним чином [3]:

$$\begin{aligned} p(r, t) &= p_1(r)(1-t/T), \quad 0 \leq t \leq T; \\ p(r, t) &\equiv 0, \quad t > T, \end{aligned} \quad (1)$$

де r – відстань від епіцентру вибуху, $p_1(r)$ – максимальний тиск, T – час дії навантаження.

Для вибуху зосереджених зарядів масою q у повітрі можна скористатися формулою Садовського [47]

$$p_1(r) = 7 \frac{q}{r^3} + 2,7 \frac{q^{2/3}}{r^2} + 0,84 \frac{q^{1/3}}{r}. \quad (2)$$

Час дії тиску представляє собою досить важливу характеристику ударної хвилі і виражається через масу заряду q та відстані r :

$$T = 0,0015 \sqrt{r} \sqrt[6]{q}, \quad (3)$$

де T подається у секундах, r – у метрах, q – у кілограмах.

Для вибухової хвилі, що генерується детонацією вибухового заряду, розташованого усередині будь якого замкнутого оболонкового об'єкту

або оболонкової камери, на стінки цього об'єкту можна розподілити на дві стадії.

Перша стадія пов'язана з навантаженням стінок при першому спаданні на них вибухової хвилі. На цій стадії стінки оболонки зазнають дію початкової відбивної хвилі малої тривалості, а на другій стадії – дії декількох наступних імпульсів тиску. Амплітуда наступних імпульсів тиску знижується із часом внаслідок необоротних термодинамічних процесів. Їхня форма може бути дуже складною внаслідок багатократного відбивання вибухових хвиль.

Хоча динаміка навантаження стінок оболонкових конструкцій при внутрішніх вибухах у випадку їх реальної геометрії є дуже складною, проте за допомогою законів подібності щодо відбитих вибухових хвиль та декількох спрощувальних припущень часто вдається отримати досить прості оцінки величини вибухового навантаження при внутрішніх навантаженнях [3].

Перше припущення полягає у тому, що падаюча та відбита хвилі мають трикутні профілі:

$$p_s(t) = \begin{cases} p_s(1-t/T), & 0 \leq t \leq T, \\ 0, & t > T; \end{cases} \quad p_r(t) = \begin{cases} p_r(1-t/T_r), & 0 \leq t \leq T_r, \\ 0, & t > T_r. \end{cases} \quad (4)$$

Однак тривалості цих ефективних хвиль задаються не співпадаючими із реальними проміжками часу дії вибухової хвилі – замість цього їм приписують такі значення, щоб зберегти правильне значення імпульсної вибухової хвилі:

$$T_s = 2J_s / p_s; \quad T_r = 2J_r / p_r. \quad (5)$$

У цьому полягає друге припущення.

Третє припущення засновано на тому, що у більшості випадках параметри внутрішнього вибухового навантаження на стінки оболонки можна визначити за допомогою характеристик нормальної (прямої) відбитої хвилі навіть при косому відбитті хвилі від стінок оболонкової системи.

Нарешті, останнє припущення визначає час пробігу хвилі, а саме час між моментами послідовного відбиття вибухових хвиль від стінок конструкції:

$$t_r = 2t_a. \quad (6)$$

Це припущення не є точним, оскільки третя і друга відбиті хвилі слабші за першу, а тому і швидкість їх розповсюдження нижче швидкості першої. Проте рівняння (6) дає похибку того ж порядку величини, що і інші спрощуючі рівняння.

З урахуванням використаних вище припущень сумарне навантаження на стінки оболонкової конструкції у 1,75 разів перевищує навантаження від першого імпульсу тиску. Тому для об'ємів із характерним часом відгуку, значно перевищуючим тривалість третього імпульсного тиску, можна застосовувати ще більш сильне припущення, об'єднавши три імпульси тиску в один та помноживши амплітуду та імпульс хвилі на множник 1.75.

Щодо трикутних імпульсів тиску без ударного фронту справедливий наступний запис [3]:

$$p(r,t) = p_r(r) \frac{t}{t_r}, \quad 0 \leq t \leq t_r; \quad p(r,t) = p_r(r) \frac{t-T}{t_r-T}, \quad 0 \leq t \leq T, \quad (7)$$

де t_r – час нарощення тиску, T – час спаду.

При розв'язанні багатьох задач зміна тиску у залежності від часу апроксимують експоненціальними показовими та степеневими функціями:

$$p_r(r,t) = p_r(r) e^{-t/T}; \quad p(r,t) = p_r(r) \left(1 - \frac{t}{T}\right)^n. \quad (8)$$

Коли навантаження змінюється по синусоїдальному закону за часом, для його запису використовують вираз у вигляді:

$$p(r,t) = p_r(r) \sin \frac{\pi t}{T}. \quad (9)$$

Імпульсні навантаження, що виникають на вибухах газових або пилових речовин, багато в чому відрізняються від навантаження, які породжуються вибухом конденсованих речовин. Надлишковий тиск, викликаний вибухом конденсованої речовини, характеризується дуже малим часом наростання та майже експоненціальним спаданням. Навантаження, яке створюється вибухом газових або запиленних об'ємів, характеризується скінченим часом нарощення та різними законами зміни за часом.

Наприклад, зміна навантаження, що викликане вибухом неідеального джерела, може бути наближено описане формулами

$$p(t) = p_m \left(\frac{t}{t_d} - \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi}{t_r} t \right), \quad t \leq t_r; \quad (10)$$

$$p(t) = p_m \left(1 - \frac{t-t_r}{t_d-t_r} \right) e^{-\frac{t-t_r}{t_d-t_r}}, \quad t_r \leq t \leq t_d,$$

де p_m – максимальне значення надлишкового тиску, t_d – тривалість навантаження.

Тоді максимальний темп нарощувального тиску, який визначається як нахил $p(t)$ при $t = t_r/2$, можна записати у вигляді

$$\frac{dp}{dt} \left(t = \frac{t_r}{2} \right) = \frac{2p_m}{t_r}. \quad (11)$$

Вибухові навантаження у вигляді імпульсного тиску можуть діяти на всю оболонкову систему або на окремі її підсистеми. При цьому навантаження можуть носити як розподілений так і локальний характер, а також переміщуватися по об'єкту це багато в чому визначає вибір розрахункової моделі та постановку задачі. Щодо математичного запису зовнішніх сил та граничних умов можна використати функції (1) – (10) та їх різне сполучення.

Безумовно, реальна картина зовнішніх сил, які діють на оболонкові системи та їх елементи при виникненні енергії вибуху, набагато складна. Тому при виборі фізичної моделі треба ретельно аналізувати всі процеси, які супроводжують вибух, щоб визначити, які фактори і в який момент часу грають визначальну роль.

В залежності від виду імпульсного навантаження великої потужності застосовуються різні методи дослідження їхнього впливу на конструкцію. Наприклад, якщо позначити через T_0 – характерний період власних коливань конструкції, а через τ^+ – тривалість позитивної фази хвилі навантаження, то при $\tau^+/T_0 \leq 0.25$ дію навантаження $F(t)$ (закон зміни тиску за фронтом ударної хвилі) можна замінити дією миттєвого імпульсу

$$S = \int_0^{\tau^+} F(t) dt. \text{ Це приводить до завищення розрахункових величин та}$$

напружень [4]. При $\tau^+/T_0 \geq 10$ виконується розрахунок на дію статично прикладеного тиску $F_{\max}$. Це припустимо при дії на конструкцію дуже довгої хвилі навантаження, наприклад, типу повітряної ударної хвилі від потужного вибуху в атмосфері [5].

Як приклад апроксимації високопотужного тиску на фронті циліндричної або сферичної ударної хвилі, що діє на внутрішню поверхню замкненої оболонки обертання, можна навести одну із формул, яку застосовують на практиці [6], [7]:

$$P(t) = P_m \exp[-(t - t_0)/\theta] F(t), \quad (12)$$

де P_m, θ – сталі, що характеризують амплітуду (максимальний тиск) та швидкість спаду тиску (характеристичний час спаду тиску); t_0 – час

затримки дії навантаження; $F(t)$ – функція розподілу тиску уздовж твірної оболонки.

При дії такого тиску вважається, що матеріал оболонки переходить у пластичний стан при виконанні умов текучості Мізеса [8], [9] із урахуванням динамічної границі текучості за законом $\sigma_i > \sigma_T^0$,

$$\sigma_T^0 = \sigma_T [1 + (e_i / D^*)^{1/n^*}], \quad (13)$$

де σ_i , e_i – інтенсивність напружень та швидкостей деформацій; σ_T^0 , D^* , n^* – параметри матеріалу, що характеризують опір матеріалу швидкопідсумному деформуванню [10], по іншому, параметри кінематичного зміцнення [11].

Вибухові явища, що приводять до імпульсного характеру прикладення навантаження до конструкції, часто представляють собою короточасний процес перетворення речовини із виділенням великої кількості енергії в невеликому об'ємі. Вказані перетворення виникають здебільшого у результаті хімічних реакцій (конденсовані, рідинні та газообразні речовини) [12], [13]. До вибухів, що викликані фізичними чинниками, можна віднести вибухи резервуарів із стислим газом, парових котлів тощо. Це можуть бути також іскрові розряди [1], [14].

При вибуху у атмосфері виникають повітряні ударні хвилі, що розповсюджуються у вигляді області стиску-розрідження зі стрибком на своєму фронті тиску, температури, щільності та швидкості часток (масової швидкості). Ефект дії ударних хвиль залежить як від виду симетрії, так і від відстані точки (лінії, площини) вибуху відносно розташування споруди на земній поверхні [5].

При повітряному вибуху ударна сферична хвиля досягає земної поверхні та відбивається від неї. На деякій відстані від епіцентру вибуху (проекції центру вибуху на земну поверхню) фронт відбитої хвилі зливається із фронтом хвилі, що падає, внаслідок чого виникає так звана головна хвиля із вертикальним фронтом, що розповсюджується від епіцентру уздовж земної поверхні і діє на споруду [10], [5].

Ближня зона, де відсутнє злиття фронтів, є зоною регулярного відбиття, в той час як дальня зона, в якій розповсюджується головна хвиля, є зоною нерегулярного відбиття. У ближній зоні при помірній відстані від вибуху тиск ударної хвилі надто великий. Характер повітряної ударної хвилі, якщо вибух стався на земній поверхні, відповідає властивостям дальньої зони цього виду вибуху [3], [15].

З моменту приходу фронту повітряної хвилі у точку земної поверхні, де може бути розташована споруда, тиск різко підвищується до

максимального значення P_ϕ , а потім спадає до атмосферного P_0 і нижче атмосферного. За фазу тиску тут приймається згадуваний вище параметр τ^+ , що характеризує період підвищеного надмірного (зверх атмосферного) тиску $\Delta P = P - P_0 > 0$, а за фазу розрядження – параметр τ_- , що характеризує період зниженого тиску $\Delta P < 0$. Водночас із тиском в ударній хвилі виникає рух повітряного середовища від епіцентру (центра) вибуху. Закони змін масової швидкості μ та густини ρ середовища в часі якісно аналогічні зміні тиску, проте внаслідок інерційності повітряного потоку період τ^{+ck} позитивної фази швидкісного напору $P_{ck} = 1/2\rho\mu^2 > 0$ трохи більше ніж τ^+ [4].

Надмірний тиск у хвилі та швидкісний напір є важливими характеристиками ударної хвилі, що визначають ефект її дії на споруду. Тому за основні параметри, що визначають інтенсивність ударної хвилі, при розрахунках приймають надмірний тиск на фронті ΔP_ϕ та тривалість

фази стиску τ^+ . Ці параметри залежать від енергії вибуху, висоти H над поверхнею землі, де знаходиться споруда, умов вибуху, а також відстані R від епіцентру [10], [4], [16]. Зважаючи на те, що максимальні деформації в конструкціях споруд здебільшого виникають у початковий період дії ударної хвилі, тобто за час, що набагато менше тривалості τ^+ , в розрахунках конструктивних елементів часто приймається зміна тиску по дотичній до істинної кривої навантаження $dP(t)$.

Розглядаючи різноманітні імпульсні навантаження високого тиску, треба завжди враховувати, що у загальному випадку відмітною рисою таких навантажень є високий рівень напружень у матеріалі конструкцій (до кількох сотень МПа), які діють, що було вже зазначено, упродовж короткого проміжку часу (мілісекунди – мікросекунди) та визначають високу швидкість зміни навантажень у часі, отже і високу швидкість деформування.

З огляду на це розгляд процесів високошвидкісного деформування, що характерно, підкреслюємо, для імпульсного прикладення навантаження великої дії, перетинається ще з одним напрямком дослідження по даному питанню. Зокрема, їх розгляд представляє великий інтерес у зв'язку з розробкою загальної теорії поведінки матеріалів під дією навантажень з урахуванням реологічних властивостей – основної проблеми механіки деформованого тіла [17], [18], [19], [20], але це питання виходить за межі об'єму даної роботи і потребує окремого додаткового дослідження.

1. Взрывные и нестационарные процессы в сплошных средах / Ред. кол. В.Н. Монахов и др. – М.: Наука, 1968г. – 163 с.
2. Высокоскоростные ударные явления. Сб. статей: Пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – 553 с.
3. Динамика оболочечных конструкций при взрывных нагрузках / Луговой Т.З., Мукоед В.П., Мейш В.Ф. Отв. ред. Гузь А.Н.; НАН Украины, Ин-т механики. – Киев: Наукова думка, 1991. – 280 с.
4. Скоростное деформирования элементов конструкций / Воробьев Ю.С., Колодяжный А.В. и др. Ин-т проблем машиностроения. – Киев: Наук. думка, 1989. – 203 с.
5. Убежища гражданской обороны: Конструкции и расчет / В.А. Котляревский, В.И. Ганумкин, А.А. Костин и др.; Под ред. В.А. Котляревского – М.: Стройиздат, 1989. – С. 6-23, 501-505.
6. *Филиппов А.П., Клименко В.Г.* Учет скорости при упругопластическом импульсном деформировании тонкостенных цилиндров // Проблемы машиностроения. – 1976. – Вып. 2. – С. 5-10.
7. *Филиппов А.П., Янютин Е.Г.* Определение начальной реакции конической оболочки на импульсную нагрузку // Прикладная механика. – 1971. – Т. 7, № 8. – С. 111-114.
8. *Ильюшин А.А.* Пластичность. – М.: Л.: Гостехиздат, 1948. – 378 с.
9. *Качанов Л.М.* Основы теории пластичности. 2-е изд. Перераб и допол. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
10. *Воробьев Ю.С., Колодяжный А.В.* Ударное воздействие взрывной волны на оболочечные конструкции // Динамика и прочность судовых машин: Сб. науч. трудов Николаевского кораблестроительного ин-та. – Николаев, 1983. – С. 94-102.
11. *Волощенко-Климовицкий Ю.Я.* Динамический предел текучести. – М.: Наука, 1965. – 180 с.
12. *Гун Г.Я.* Математическое моделирование процессов обработки материалов давлением. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
13. *Ионов В.Н., Огибалов П.М.* Напряжения в телах при импульсном нагружении. – М.: Высша школа, 1975. – 463 с.
14. *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1966. – 268 с.
15. *Николас Т.* Упругопластические волны напряжений // Динамика удара // Пер. с англ. под ред. С.С. Григоряна. – М.: Мир, 1985. – С. 116-148.
16. *Филиппов А.П.* Деформирование элементов конструкции под действием ударных импульсных нагрузок. – Киев: Наук. думка, 1978. – 193 с.
17. *Майборода В.П., Кравчук А.С., Холин Н.Н.* Скоростное деформирование конструкционных материалов. – М.: Машиностроение. – 1986. – 264 с.
18. *Орленко Л.П.* Поведение материалов при интенсивных динамических нагрузках. – М.: Машиностроение, 1964. – 168 с.
19. *Райтхардт Дж., Пирсон Дж.* Поведение материалов при импульсных нагрузках. – М.: Изд-во иностр. лит., 1968. – 297 с.
20. *Степанов Г.В.* Упругопластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок. – Киев: Наукова думка, 1979. – 266 с.

Надійшло до редакції 10.11.2006 р.