

ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРОЕКТУВАННЯ ТА ЗАПРОВАДЖЕННЯ РЕСУРСЕКОНОМНИХ КОНСТРУКЦІЙ, БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД

УДК 624.012.45

ВПЛИВ ДЕМПФУВАННЯ ТА ЧАСУ ДІЇ ТИСКУ НА ЗУСИЛЛЯ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ДІЇ ВИБУХОВОГО НАВАНТАСЖЕННЯ

INFLUENCE OF DAMPING AND PRESSURE DURATION ON THE STRENGTHS OF STRUCTURES UNDER EXPLOSIVE LOADING

Азізов Т.Н., д.т.н., проф., Orcid [0000-0001-9621-9805] (Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини); Кочкар'ов Д.В., д.т.н., проф. Orcid [0000-0002-4525-7315] (Національний університет водного господарства та природокористування)

Taliat Azizov, Doctor of Engineering, Professor, (PavloTychynaUmanState PedagogicalUniversity, Ukraine); **Dmitro Kochkarev, Doctor of Engineering, Professor** (National University of Water and Environment Engineering, Ukraine)

В статті розглянуто різні варіанти визначення коефіцієнта динамічності в залежності від коефіцієнту демпфування, періоду коливань та часу дії позитивної фази. Зазвичай не врахування демпфування пов'язано з спрощенням розрахунків. В статті показано, що врахуванням коефіцієнту демпфування, якщо він об'єктивно обґрунтований, а також врахуванням реальної криволінійної діаграми тиску можна економити матеріали зменшенням коефіцієнту динамічності. Показано, що не завжди можна приймати розрахунок за миттєвим імпульсом, тому що максимальний відгук може відбуватися в першій фазі коливань

The article presents an analysis of the influence of the damping coefficient, the phase of structural vibrations, and the duration of the explosion wave on the magnitude of the dynamic factor. Different methods for determining the dynamic factor depending on these factors are considered. In the literature, the disregard of damping is associated with simplifying calculations. The article demonstrates that in some cases, to save materials, the dynamic factor can be reduced by up to 16%. When considering the actual curvilinear pressure diagram of the explosion wave, the maximum response of the system may occur in the first phase of oscillations. Therefore, it is shown that instantaneous impulse calculation is not always applicable. By considering the damping coefficient (if objectively justified) and the actual curvilinear pressure diagram, materials can be saved by reducing the dynamic factor. It is demonstrated that a more accurate calculation method is direct integration of

the equations of motion. However, for multi-mass systems, solving these equations is only possible through numerical methods. In such systems, the vibration frequencies for different modes can significantly differ. Thus, the question arises of which integration step to choose for a more accurate solution, as an optimal step for one frequency may not be suitable for another. In such cases, a better approach is the well-known modal superposition method, which transforms the coupled system of differential equations in physical coordinates into independent differential equations in modal coordinates. These second-order differential equations for a linear oscillator are easily solved in closed form, allowing the derivation of an analytical solution for both linear and curvilinear pressure functions, with or without considering the negative pressure phase. Given that these equations are analytically solvable, the problem of selecting the appropriate integration step is automatically eliminated.

Ключові слова: вибухова хвиля, коефіцієнт демпфування, коефіцієнт динамічності, рівняння коливань, крок інтегрування
blast wave, damping coefficient, dynamic coefficient, oscillation equation, integration step

Аналіз досліджень і постановка задачі.

На сьогодні актуальним завданням української науки є розвиток методик розрахунку будівельних конструкцій за дії тиску від вибухової хвилі. Розрахунок конструкції за дії тиску від вибухової хвилі можна виконувати методом прямого інтегрування рівнянь руху [13], методом модального аналізу, квазістатичним методом [4, 10-12]. Квазістатичний метод розрахунку передбачає визначення коефіцієнта динамічності. Кожний метод має свої переваги і недоліки. Найточнішим є метод прямого інтегрування рівнянь руху, при якому можна враховувати нелінійність деформування конструкції, нелінійну роботу матеріалів, змінний коефіцієнт демпфування. Однак, точність результату залежить від кількості точок розв'язку рівнянь руху (кроку інтегрування). Зважаючи на те, що в багатомасових системах періоди і частоти коливань в різних модах можуть суттєво відрізнятися, ця проблема стає достатньо гострою. Задавання дуже маленького кроку інтегрування суттєво збільшує час розрахунку, що особливо при варіантних розрахунках сильно ускладнює аналіз.

В програмних комплексах Ліра-САІР, Lira 10, SCAD існує можливість розрахунку методом прямого інтегрування руху, спектральним методом. Однак спектральний метод призначений для розрахунку за дії сейсмічного навантаження. Основи пристосування такого методу до розрахунку за дії вибухового навантаження наведені в [7, 9].

Відомо, що замість рішення системи диференціальних рівнянь в лінійних системах можна застосовувати метод модальної суперпозиції, коли система n

пов'язаних рівнянь перетворюється в n незалежних рівнянь в модальних координатах [2, 3, 10]. Відомо також [11], що при розгляді навантаження у вигляді імпульсів різного виду при малому часі дії імпульсу вважається, що можна не враховувати демпфуючі властивості конструкції, однак аналізу цього ефекту з числовим поясненням не зроблено.

З огляду на вищесказане, метою статі є аналіз впливу коефіцієнта демпфування на величину коефіцієнта динамічності, а також визначення переваг і недоліків застосування методу модальної суперпозиції Викладення основного матеріалу.

Як було сказано вище, вважається, що при імпульсивному навантаженні затухання значно менше впливає на процес деформування. Максимум реакції досягається за дуже короткий проміжок часу, перш ніж сили затухання зможуть поглинути значну долю енергії, що передається на споруду [11].

Відомо, що в розрахунках за дії динамічного навантаження часто застосовують коефіцієнт динамічності, отриманий з розрахунку одномасового осцилятора. Так, при дії динамічного навантаження у вигляді трикутного імпульсу $F(t)=P(1-t/\tau)$ диференціальне рівняння з врахуванням коефіцієнта демпфування виглядає так:

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_0 \dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{P}{m}(1 - t/\tau) \quad (1)$$

де ω_0 – частота коливань; ξ – коефіцієнт демпфування; P – максимальне значення сили (при $t=0$); τ – час дії тиску (в нашому випадку час дії позитивної фази тиску вибухової хвилі).

Рішення рівняння (1) має вигляд:

$$x(t) = EXP(-\xi\omega_0 t)[C_1 \cos(\omega_D t) + C_2 \sin(\omega_D t)] + A + Bt \quad (2)$$

де ω_D – частота демпфованих коливань:

$$\omega_D = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2} \quad (3)$$

Вирази для констант A, B мають вигляд:

$$A = \frac{P}{m\omega_0^2} \left(1 + \frac{2\xi}{\omega_0 \tau} \right); \quad B = -\frac{P}{m\omega_0^2 \tau} \quad (4)$$

Швидкість руху коливань маси m визначається за виразом:

$$\dot{x}(t) = EXP(-\xi\omega_0 t) \{ -\xi\omega_0 [C_1 \cos(\omega_D t) + C_2 \sin(\omega_D t)] + C_2 \omega_D \cos(\omega_D t) - C_1 \omega_D \sin(\omega_D t) \} + B \quad (5)$$

Константи C_1, C_2 в виразах (2), (5) визначаються з початкових умов, які в нашому випадку є нульовими.

Відомо [1, 9], що максимальний відгук конструкція може мати як в першій фазі коливань (при $t \leq \tau$), тобто коли сила ще діє, так і в другій фазі (в фазі вільних коливань). Тому при визначенні коефіцієнта динамічності слід мати рівняння руху в другій фазі, коли права частина рівняння (1) дорівнює нулю. В цьому випадку рішення має вигляд:

$$x_2(t) = EXP(-\xi \omega_0 t_1) [D_1 \cos(\omega_d t) + D_2 \sin(\omega_d t)] \quad (6)$$

де час $t_1 = t - \tau$, а константи D_1, D_2 визначаються від початкових умов, якими є значення переміщення $x(\tau)$ і швидкості $\dot{x}(\tau)$, тобто значення переміщення і швидкості в кінці першої фази.

Коефіцієнт демпфування має різні значення для конструкцій з різних матеріалів. Так, довідкова література [5] дає значення для коефіцієнтів демпфування, які наведені в таблиці 1

Таблиця 1.

Значення коефіцієнта демпфування

Матеріал	Коефіцієнт ξ	
	При динамічному навантаженні I і II категорії	При динамічному навантаженні III і IV категорії
Залізобетон звичайний	0.05	0.1
Прокатна сталь	0.01	0.025
Цегляна кладка	0.04	0.08
Деревина	0.03	0.05

Розглянемо, як впливає коефіцієнт демпфування ξ на коефіцієнт динамічності β в залежності від часу дії позитивної фази вибуху τ та періоду коливань конструкції T . В таблицях 2-4 наведені результати визначення коефіцієнта динамічності як відношення максимального динамічного переміщення до статичного переміщення від дії максимального значення сили P . Значення переміщень і швидкостей отримані з рішень (2), (5) та (6) для переміщень і швидкостей в обох фазах коливань. Максимальні значення часу $t_{\max}$ для всіх варіантів прийняті 7 сек. В таблиці 2 наведені дані для часу дії позитивної фази $\tau=4.43$ мілісекунди і коефіцієнта демпфування $\xi=0.05$; в таблиці 3 – для часу дії позитивної фази $\tau=7.03$ мілісекунди і коефіцієнта демпфування $\xi=0.05$; в таблиці 4 – для часу дії позитивної фази $\tau=4.43$ мілісекунди і коефіцієнта демпфування $\xi=0.1$.

З таблиць 2-4 можна бачити, що врахування демпфування впливає, але не суттєво. Більший вплив демпфування проявляється при максимальному коефіцієнті $\xi=0.1$. При цьому коефіцієнт динамічності, отриманий з врахуванням демпфування менший за аналогічний коефіцієнт без врахування демпфування на 16%. Великі значення відношення β/β_d (другі варіанти таблиць 2-4) пов'язані з резонансними явищами і їх можна не брати

до уваги. При значенні коефіцієнта демпфування $\xi=0.05$ різниця між коефіцієнтами динамічності складає 8%.

Як було сказано вище, в літературі пропонується, що в розрахунках за дії короткочасного імпульсу можна не враховувати демпфування [11]. Це пов'язано з спрощенням розрахунків. Однак, в окремих випадках для економії матеріалів можна враховувати значення різниці в коефіцієнтах динамічності до 16% в залежності від матеріалу конструкції, якщо є об'єктивні дані про значення коефіцієнту демпфування.

Таблиця 2.

Значення коефіцієнтів динамічності для $\tau=4.43$ мс; $\xi=0.05$

Варіант №	Період T (сек)	Відношення τ/T	Коефіцієнт динамічності		Відношення β/β_d
			Без демпфування β	З демпфуванням β_d	
1	0.01	0.4403	1.1143	1.0307	1.0811
2	0.02	0.2202	0.6556	0.5189	1.2635
3	0.04	0.1101	0.3412	0.3162	1.0792
4	0.06	0.0734	0.2292	0.2124	1.0791
5	0.08	0.0550	0.1723	0.1597	1.0791
6	0.1	0.0440	0.1380	0.1279	1.0791
7	0.12	0.0367	0.1151	0.1067	1.0791
8	0.14	0.0315	0.0987	0.0915	1.0791
9	0.16	0.0275	0.0864	0.0800	1.0791
10	0.18	0.0245	0.0768	0.0712	1.0791
11	0.2	0.0220	0.0691	0.0641	1.0791
12	0.3	0.0147	0.0461	0.0427	1.0791
13	0.4	0.0110	0.0346	0.0320	1.0791
14	0.5	0.0088	0.0277	0.0256	1.0791
15	0.6	0.0073	0.0231	0.0214	1.0791
16	0.7	0.0063	0.0198	0.0183	1.0791
17	0.8	0.0055	0.0173	0.0160	1.0791
18	0.9	0.0049	0.0154	0.0142	1.0791
19	1	0.0044	0.0138	0.0128	1.0791

Розглянемо ще один важливий момент розрахунку за дії тиску ударної повітряної хвилі. В розрахунках часто приймають, що імпульс діє миттєво [8,

13]. Це означає, що коливання конструкції розглядається лише в другій фазі (фазі вільних коливань). При дуже короткому часі дії вибухової хвилі це дійсно можна вважати за правильне. При спрощенні реальної криволінійної епюри тиску вибухової хвилі у вигляді лінійної [13] час дії τ зменшується через те, що він розраховується з умови рівності реального імпульсу до імпульсу при лінійному розподілі тиску. Так, для вибухової речовини 800 кг на відстані 15 метрів від епіцентру реальний час дії позитивної фази складає 16.43 мс (для прямого тиску), а при спрощеному лінійному розподілі цей час складає 7.03 мс. Дослідженнями авторів встановлено [1, 9], що при врахуванні реальної криволінійної діаграми тиску максимальний відгук системи може відбуватися в першій фазі коливань (в фазі, коли тиск ще діє), а розрахунок на дію миттєвого імпульсу передбачає лише другу фазу коливань.

Таблиця 3.

Значення коефіцієнтів динамічності для $\tau=7.03$ мс; $\xi=0.05$

Варіант №	Період Т (сек)	Відно-шення τ/T	Коефіцієнт динамічності		Відно-шення β/β_d
			Без демп-фування β	З демп-фуванням β_d	
1	0.02	0.3515	0.9616	0.8886	1.0822
2	0.04	0.1758	0.5330	0.4640	1.1486
3	0.06	0.1172	0.3621	0.3355	1.0792
4	0.08	0.0879	0.2734	0.2533	1.0791
5	0.1	0.0703	0.2194	0.2033	1.0791
6	0.12	0.0586	0.1831	0.1697	1.0791
7	0.14	0.0502	0.1571	0.1456	1.0791
8	0.16	0.0439	0.1375	0.1275	1.0791
9	0.18	0.0391	0.1223	0.1134	1.0791
10	0.2	0.0352	0.1101	0.1020	1.0791
11	0.3	0.0234	0.0736	0.0682	1.0791
12	0.4	0.0176	0.0552	0.0511	1.0791
13	0.5	0.0141	0.0442	0.0409	1.0791
14	0.6	0.0117	0.0368	0.0341	1.0791
15	0.7	0.0100	0.0315	0.0292	1.0791
16	0.8	0.0088	0.0276	0.0256	1.0791
17	0.9	0.0078	0.0245	0.0227	1.0791
18	1	0.0070	0.0221	0.0205	1.0791

Таким чином, розрахунок без врахування демпфування, а також прийняттям миттєвого імпульсу їде в запас міцності. Врахуванням коефіцієнту демпфування (якщо він об'єктивно обґрунтований), а також врахуванням реальної криволінійної діаграми тиску можна економити матеріали за рахунок розгляду зменшеного коефіцієнту динамічності.

Таблиця 4.

Значення коефіцієнтів динамічності для $\tau=4.43$ мс; $\xi=0.1$

Варіант №	Період T (сек)	Відношення τ/T	Коефіцієнт динамічності		Відношення β/β_d
			Без демпфування β	З демпфуванням β_d	
1	0.01	0.4403	1.1143	0.9574	1.1638
2	0.02	0.2202	0.6556	0.4745	1.3819
3	0.04	0.1101	0.3412	0.2943	1.1595
4	0.06	0.0734	0.2292	0.1977	1.1593
5	0.08	0.0550	0.1723	0.1486	1.1593
6	0.1	0.0440	0.1380	0.1191	1.1593
7	0.12	0.0367	0.1151	0.0993	1.1593
8	0.14	0.0315	0.0987	0.0851	1.1593
9	0.16	0.0275	0.0864	0.0745	1.1593
10	0.18	0.0245	0.0768	0.0662	1.1593
11	0.2	0.0220	0.0691	0.0596	1.1593
12	0.3	0.0147	0.0461	0.0398	1.1593
13	0.4	0.0110	0.0346	0.0298	1.1593
14	0.5	0.0088	0.0277	0.0239	1.1593
15	0.6	0.0073	0.0231	0.0199	1.1593
16	0.7	0.0063	0.0198	0.0170	1.1593
17	0.8	0.0055	0.0173	0.0149	1.1593
18	0.9	0.0049	0.0154	0.0133	1.1593
19	1	0.0044	0.0138	0.0119	1.1593

Відомо, що найбільш точним методом розрахунку є розрахунок прямим інтегруванням рівнянь руху. Але в системах з багатьма масами, якими є практично всі споруди цивільного захисту, рішення цих рівнянь можливе лише чисельним методом. В системах з багатьма масами періоди і частоти коливань для різних форм можуть суттєво відрізнятися. У зв'язку з цим стає

питання, який крок інтегрування прийняти для отримання якомога точнішого рішення, адже вдалий крок для однієї частоти може бути невдалим для іншої частоти. Тому в деяких програмних комплексах [6] існує можливість змінення кроку інтегрувань рівнянь руху (рис. 1). Однак і це не завжди призводить до бажаних результатів. В той же час існує відомий метод модальної суперпозиції [10], за якого пов'язану систему n диференціальних рівнянь (де n – кількість мас в системі) в фізичних координатах можна привести до n незалежних диференціальних рівнянь в модальних координатах. Такі диференціальні рівняння другого порядку для одномасового осцилятора легко вирішувати в замкненому вигляді, причому як для лінійної функції тиску, так і для криволінійної, як з врахуванням негативної фази тиску, так і без її врахування [1, 7, 9]. Враховуючи, що ці рівняння вирішуються аналітично, проблема правильного вибору автоматично відпадає. Крім того, вирішувати n окремих рівнянь набагато простіше, ніж систему пов'язаних рівнянь. Після рішення рівнянь в модальних координатах неважко перейти до фізичних переміщень [10].

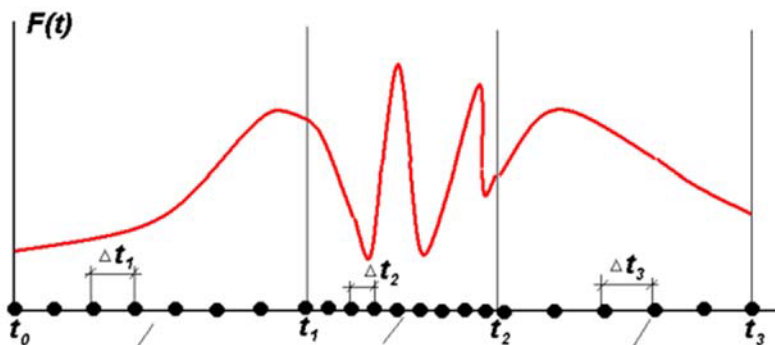


Рис. 1. Схема зміни кроку інтегрування на різних інтервалах в програмі SCAD

Розрахунки, виконані авторами цієї статті методом модальної суперпозиції, показали суттєву різницю в зменшенні часу розрахунку в порівнянні з рішенням системи диференціальних рівнянь. Прийнятий в програмних комплексах розрахунок з модальним розкладенням передбачає розглядання максимальних зусиль, але при цьому втрачається точність при складанні зусиль різними методами (SRSS, CQC та інші). Якщо ж отримати реальні переміщення кожної маси в часі з застосуванням розкладення на окремі рівняння, а потім в кожний час t скласти значення, то можна отримати точніші дані про зусилля і переміщення.

Для спрощення розрахунку з застосуванням існуючих програмних комплексів можна використовувати інженерний підхід, запропонований авторами в роботах [7, 9].

Висновки і перспективи досліджень. . В окремих випадках для економії матеріалів можна враховувати зменшення коефіцієнту динамічності до 16% в залежності від матеріалу конструкції, якщо є об'єктивні дані про значення коефіцієнту демпфування. Розрахунок без врахування демпфування, а також прийняттям миттєвого імпульсу іде в запас міцності. Врахуванням коефіцієнту демпфування (якщо він об'єктивно обґрунтований), а також врахуванням реальної криволінійної діаграми тиску можна економити матеріали за рахунок розгляду зменшеного коефіцієнту динамічності.

Для запобігання суттєвого зменшення кроку інтегрування рівнянь руху слід використовувати відомий метод, коли система n пов'язаних диференціальних рівнянь в фізичних координатах вирішується як n окремих рівнянь в модальних координатах.

В перспективі передбачається складання таблиць залежності коефіцієнта динамічності для декількох базових значень кількості вибухівки, часу дії позитивної фази тиску як для лінійного розподілу тиску, так і для криволінійного з врахуванням різних значень коефіцієнта демпфування

1. Азізов Т.Н., Кочкарьов Д.В. Границі застосування квазістатичного методу розрахунку на дію вибухової хвилі// Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Вип. 46. – Рівне: Нац. ун-т водного господарства та природокористування, 2024. – С. 143-152.

2. Баженов В.А., Дехтярюк Є.С. Будівельна механіка. Динаміка споруд. – Київ: ІЗМН, 1998. – 235 с.

3. Баженов В.А., Перельмутер А.В., Шишов О.В. Будівельна механіка. Комп'ютерні технології. Підручник. – К.: Каравела, 2009. – 310 с.

4. ДБН В.2.2-5:2023 Захисні споруди цивільного захисту. Київ: Міністерство розвитку громад та територій України, 2023. – 87 с.

5. Довідник проєктувальника промислових, житлових та громадських будівель і споруд. Книга 2, 1973. – 415 с.

6. Карпиловський В.С., Криксунов А.А., Перельмутер А.В. та ін. SCAD Office. 5 видання. Київ, 2024. – 993 с.

7. Кочкарьов Д.В., Азізов Т.Н. Встановлення бальності ударних повітряних хвиль // Тези доповідей науково-технічного симпозиуму «Актуальні проблеми розрахунків будівельних конструкцій» Київ, 2024. - с. 6-8.

8. Рабинович І.М. Курс будівельної механіки стрижневих систем. Частина II., 1954. – 544 с.

9. Azizov T., Kochkarev D. Engineering Methodology for Calculation of Bending Structures under the Action of a Shock Air Wave// Science of Europe. #155 (2024) – p. 115-119

10. Birbraer A. N. . Extreme Actions on Structures. 2009.- 593 p.

11.. Clough R.W., Penzien J. Dynamics of Structures. New-York, 1975. – 319 p.

12. Karlos V, Solomos G (2013) Calculation of blast loads for application to structural components, JRC Technical report, EUR 26456 EN. <https://doi.org/10.2788/61866>

13. Unified Facilities Criteria (2008), “UFC 3-340-02 Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions“, U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency.