

Дослідження фізичних аспектів розсіяння енергії в матеріалах при статичному та динамічному їх навантаженні

І.І. Назаренко¹ • А.В. Запривола¹ • А.Є. Бондаренко² • М.М.Нестеренко³ • В.С. Слюсар¹

Received: 3 March 2022 / Accepted: 30 May 2022

Анотація. В роботі проведено дослідження по визначенню якісної картини та кількісних змін розсіяння енергії в конкретних матеріалах і середовищах за різних законів їх навантаження, обробки та створенню нових сумішей та матеріалів. З'ясовано, що для визначення дисипативних характеристик застосовуються різні методи, оцінка яких утруднює оцінити достовірність отриманих результатів, оскільки приймаються різні передумови та допущення. Дослідження фізичних аспектів розсіяння енергії в матеріалах і середовищах здійснено за лінійним та нелінійним законами навантаження на основі використання методів петлі гістерезису в перехідному та сталому режимів навантаження. Виявлено, що форма петлі гістерезису залежить певною мірою від закону зміни навантаження за цикл. Використано метод згасаючих коливань для оцінки поглинання енергії за визначенням логарифмічного декременту коливань. За результатами обробки результатів вимірювання виявлено, що в рамках виконаних досліджень коефіцієнт поглинання енергії змінюється в межах 0,04–0,20 залежить від амплітуди відносної деформації. Запропонована аналітична залежність для визначення енергії, яка може бути використаною для будь якого середовища або матеріалу, яке володіє пружно-в'язкими властивостями і знаходиться під дією силового навантаження. За фізичним сенсом ця формула визначає витрати енергії на одиницю об'єму матеріалу, враховує асиметрію навантаження і може слугувати енергетичним критерієм розсіяння енергії в матеріалах при їх навантаженні.

Ключові слова: розсіяння енергії, напруження, деформація, матеріал, середовище, параметри, петля гістерезису, декремент коливання.

Вступ

При проектуванні і конструюванні машин та обладнання для визначення основних параметрів робочого процесу виникає необхідність врахування фізико-механічних властивостей оброблювальних матеріалів та їх компонентів. Такими властивостями являються: пружність, в'язкість, пластичність, міцність. Доцільність їх врахування залежить від ступеня впливу на параметри машин, що обумовлено видом технологічної

операції робочого процесу. Процедура врахування вказаних властивостей полягає у виборі фізичної моделі із наступним математичним описом і оцінкою впливу у вигляді розрахункових залежностей при визначенні тих чи інших параметрів машин. З фізичної точки зору вибір моделі обумовлений основними характеристиками: деформацією і напруженнями, які виникають при протіканні будь-якої технологічної операції і утворюють напружено-деформований стан. Зсув по фазі між напруженнями і деформацією в дисипативному середовищі обумовлено поглинанням енергії і можуть бути визначені різними фізичними явищами. Основні з них: в'язке тертя, механічний гістерезис, пластична текучість матеріалу, релаксація матеріалу [1]. В'язке або рідинне тертя, обумовлене тертям частинок речовини між собою. Чим більша відносна швидкість руху частинок, тим вона більша [1]. Тому коефіцієнт втрат при в'язкому терті є пропорційним частоті, а опір втрат може як залежати так і не залежати від тих чи інших параметрів, в тому числі і від частоти. Механічний гіс-

✉ І.І. Назаренко
ii_nazar@ukr.net

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

² Одеська академія будівництва і архітектури, Одеса, Україна

³ Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка", Полтава, Україна

терезис називають тертям твердого тіла [2] або внутрішніми втратами [3, 4]. При дії сили на напружене середовище в останньому відбуваються незворотні мікроміні структури (поворот і руйнування кристалів у металах, руйнування молекулярних ланцюгів у пластмасах тощо). В результаті цього при знятті навантажень у середовищі утворюється залишкова деформація, яка при періодичному процесі призводить до відставання по фазі деформації від відповідного напруження. Залежність між ними набуває гістерезисного характеру і визначається постійною гістерезису – відношенням залишкової деформації до максимальної. При малих деформаціях постійна гістерезису рівна коефіцієнту витрат, тобто куту між векторами напруження і деформації. Процес врахування фізичних властивостей розсіяння енергії в матеріалах при статичному та динамічному їх навантаженні є надто складним і в значній мірі залежить від достовірності визначених функціональних залежностей, що і являє собою основне завдання даного дослідження.

Аналіз літературних джерел і постановка проблеми

Застосуванню та дослідженню методів фізичних властивостей розсіяння енергії в матеріалах присвячені роботи [1–4]. Серед різних причин, що обумовлюють гасіння коливань механічних систем, особливий інтерес представляє природне поглинання енергії коливань в матеріалі пружних елементів самої коливальної системи. Будь-який реальний матеріал здатний при його циклічному деформуванні в більшій або меншій степені поглинати енергію циклічного деформування, перетворюючи її в теплоту, яка потім розсіюється. Має місце низка робіт [1, 3, 4], по визначенню якісної та кількісної картини зміни фізичних властивостей розсіяння енергії в конкретних матеріалах і середовищах за різних законів їх навантаження, обробки та створенню нових сумішей та матеріалів. При цьому використовуються моделі з дискретними та розподіленими параметрами [5, 6]

Відомі розрахункові співвідношення визначення розсіяння енергії (дисипативних сил)/ метод загасаючих коливань, метод фазового кута та інших/ виходять із припущення про закономірності зміни цих сил опору, пропорційні першого ступеня швидкості коливань. Огляд літературних даних [3, 4] показує, що таким вимогам повною мірою відповідає метод динамічної петлі гістерезису, що дозволяє встановити характер і величину сил опору без апріорних припущень про закономірності їх зміни.

Застосування такого методу дає можливість виключити вплив втрат енергії в елементах конструкції машини на результати досліджуваних дисипативних та пружних характеристик середовища. Метод динамічної петлі гістерезису встановлення залежностей між

напруженням і деформацією знайшов широке застосування при дослідженні поведінки різних за своєю природою і структурою матеріалів. Якщо для недосконало пружних тіл будуть отримані практично рівнозначні результати в координатах “напруження – деформація” або в координатах “сила – переміщення” то для пружно – в’язких матеріалів але не для бетонної суміші. Пояснюється це тим, що характер розподілу переміщення шарів бетонної суміші по висоті стовпа дуже складний і не відповідає характеру розподілу напружень. Так, амплітуди переміщень на поверхні виробу, що формується, можуть бути більше, ніж у середині виробу, у той час як амплітуди деформації у верхніх шарах бетону будуть найменшими і дорівнюють нулю на вільній поверхні. На вільній поверхні напруження також відсутні. Таким чином, напруження, що виникають у шарі бетонної суміші, визначаються деформацією цього шару, а не абсолютним його переміщенням. Разом з тим, мало уваги приділено законам зміни реологічних властивостей матеріалів і технологічних середовищ, які суттєво впливають на розсіяння енергії. Достовірність результатів таких досліджень потребує узгодження законів зміни між напруженням і деформацією в матеріалах і середовищах на основі використання методу петлі гістерезису. Такий підхід дає можливість розкрити фізичну сутність розсіяння енергії в матеріалах при статичному та динамічному їх навантаженні та врахувати отримані результати при проектуванні і конструюванні машин і обладнання для визначення основних параметрів робочого процесу.

Мета і задачі дослідження

Метою досліджень є визначення фізичних аспектів розсіяння енергії в матеріалах і середовищах при статичному та динамічному їх навантаженні.

Для досягнення означеної мети вирішувалися наступні задачі:

- обґрунтування та розробка методів розсіяння енергії в матеріалах і середовищах;
- дослідження фізичних аспектів розсіяння енергії в матеріалах і середовищах за лінійним законом навантаження;
- дослідження фізичних аспектів розсіяння енергії за не лінійним законом навантаження.

Розробка методів дослідження розсіювання енергії в матеріалах і середовищах

Здатність матеріалу не зворотно поглинати механічну енергію обумовлена його недосконалою пружністю, що виявляється в нелінійності та неоднозначності залежностей між напруженням і деформацією при навантаженні та розвантаженні та приводить до утворення петлі гістерезису (рис. 1).

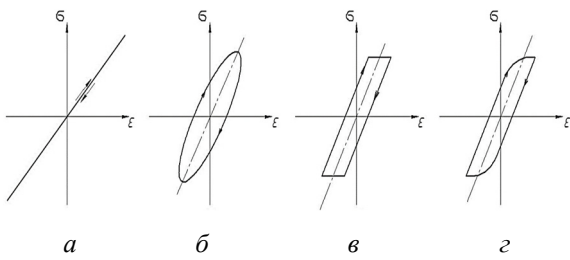


Рис. 1. Залежність “напруження-деформація” при деформуванні матеріалів: *a* – пружного; *б* – в’язкопружного; *в* – пружнопластичного; *з* – гістерезисного

Математична модель розсіювання енергії у в’язко-пружному тілі, до яких відноситься бетонна суміш та подібні матеріали приймається на основі методу динамічної петлі гістерезису. Для цього розглянемо рух приведеної маси *m* бетонної суміші, моделюючи її системою із однією ступінню волі. Переміщення маси *x* під дією зовнішньої сили *F* описується рівнянням:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + f(x) = F \sin(\omega t + \phi). \quad (1)$$

Закон руху (1) описується функцією:

$$x = x_0 \sin(\omega t + \phi). \quad (2)$$

Приймаючи умову, що початкова фаза $\phi = 0$ в момент $t = 0$ $x = 0$, а коли $t = \frac{\pi}{2\omega}$ $x = x_0$.

Якщо виключити з (1) час *t* то після нескладних перетворень отримаємо рівняння петлі гістерезису [3]:

$$F = [f(0) \operatorname{ctg} \phi - f(x_0)] \frac{x}{x_0} + f(x). \quad (3)$$

Отримане рівняння (3) засвідчує, що положення петлі гістерезису у просторі визначається кутом зсуву фаз ϕ . Петля гістерезису в координатах “напруження - деформація” наведено на рис. 2.

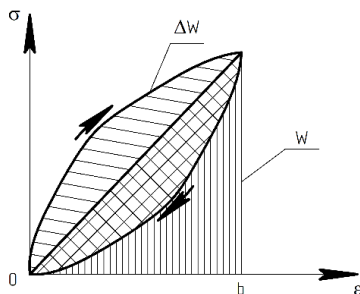


Рис. 2. Петля гістерезису в координатах “напруження-деформація”

Трикутник *OAB* виражає енергію *W*, деформації бетонної суміші, а площа, обмежена дугами *OA* і *AO*, і *ε* та енергія ΔW , що розсіюється. Співвідношення цих

енергій $\frac{\Delta W}{W}$ визначається коефіцієнтом поглинання енергії:

$$\Psi = \frac{\Delta W}{W}. \quad (4)$$

В практичних розрахунках користуються коефіцієнтом опору γ :

$$\gamma = \frac{\Delta W}{2\pi W} = \frac{\Psi}{2\pi}, \quad (5)$$

де 2π – число, що характеризує циклічність процесу деформації.

В роботах [2, 4] систему координат розташовують в центрі петлі гістерезису (рис. 1).

За симетричним циклом деформування матеріалу рівняння вихідної ($\bar{\sigma}$) і низхідної ($\bar{\sigma}$) гілок петлі гістерезису, представляється у вигляді [2]

$$\bar{\sigma}(\epsilon) = E \left\{ \epsilon \mp \sum_n \chi_n \left[(\epsilon_0 \pm \epsilon)^n - 2^{n-1} \epsilon_0^n \right] \right\}, \quad (6)$$

де *E* –модуль пружності матеріалу; *n*, χ_n - параметри петлі гістерезису, що підлягають визначенню.

Визначення коефіцієнта поглинання енергії по резонансній петлі гістерезису здійснюється шляхом введення дослідженого матеріалу чи середовища в резонанс (рис. 3).

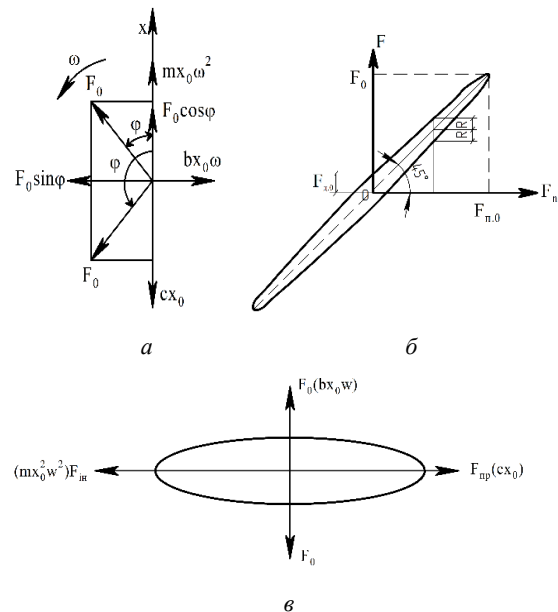


Рис. 3. Розрахункові схеми для визначення коефіцієнта поглинання енергії по резонансній петлі гістерезису: *a* – векторна діаграма сил до резонансного режиму; *б* – петля гістерезису для до резонансного режиму в координатах “зовнішня сила F_0 – пружна сила F_{np} ”; *в* – петля гістерезису для резонансного режиму

На діаграмі (рис. 3, а) наведені вектори сил рівняння (1) з заміною $f(x)$ на cx . Відкладено амплітуду переміщення у вигляді вектора, спрямованого вгору (рис. 3, а). Тоді вектор амплітуди сили пружності cx_0 буде спрямований вниз. Сила опору $b\dot{x} = bx_0\omega\cos(\omega t - \varphi)$ має амплітуду $bx_0\omega$, і її вектор буде повернутий відносно сили пружності на 90° . Сила інерції $m\ddot{x} = mx_0\omega^2 \times \sin(\omega t - \varphi)$ має амплітуду $mx_0\omega^2$, і її вектор на 90° випереджає сили опору, тобто перебуває в протифазі із силою пружності. Амплітуда змушуючої сили F_0 випереджає переміщення на кут φ . За значення кута $\varphi < 90^\circ$ векторна діаграма сил відображає до резонансний режим, а за значенням кута $\varphi > 90^\circ$ векторна діаграма сил відображає за резонансний режим. Відрізок, що знаходиться між гілками петлі гістерезису на будь-якої прямої (рис. 3, б), яка паралельна вісі ординат, являє собою подвійну силу дисипативного опору ($2F\delta$) і дорівнює відповідному значенню пружної сили опору F_n .

Резонанс настає за умови (рис. 3, в) рівності сили інерції й сили пружності: $mx_0\omega^2 = cx_0 = m\omega_0^2x_0$, що реалізується при рівності вимушеної частоти коливань ω і власної ω_0 ($\omega = \omega_0$). При цьому змушуюча сила врівноважує силу опору $F_0 = bx_0\omega$ й кут зсуву фаз $\varphi = \pi/2$. В резонансі коефіцієнт b :

$$b = \frac{F_0}{x_0\omega}, \tag{7}$$

або:

$$b = \frac{\Psi_c}{2\pi\omega} = \gamma \frac{c}{\omega}. \tag{8}$$

Порівнюючи вирази (7) і (8) між собою і враховуючи, що сила пружності $F_n = cx_0$ отримаємо вираз для коефіцієнта опору γ в резонансі:

$$\gamma = \frac{F_0}{F_n}. \tag{9}$$

Форма петлі гістерезису залежить певною мірою від закону зміни навантаження за цикл, якщо тривалість останнього невелика.

Щодо методу згасаючих коливань то параметром оцінки поглинання енергії слугує логарифмічний декремент коливань δ , який визначається за виразом [3]:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{x_i}{x_{i+n}}. \tag{10}$$

де n - число циклів коливань; x_i - числове значення амплітуди коливань на i - ділянці; x_{i+n} - числове значення амплітуди коливань на $i+n$ ділянці. Визначити коефіцієнт δ можна і через коефіцієнт поглинання енергії Ψ :

$$\delta = \frac{\Psi}{2}. \tag{11}$$

Дослідження фізичних аспектів розсіяння енергії в матеріалах і середовищах за лінійним законом навантаження

З'ясовано, що в рамках виконаних дослідів [7], які проводилися в резонансному режимі коливань при гармонійному навантаженню форма петлі гістерезису є еліптичною. Визначені в роботі [7] числові значення коефіцієнта поглинання Ψ при різних частотах для деяких матеріалів методами статичної і резонансної петлі гістерезису та методом згасаючих коливань, приведені в таблиці 1.

Як слідує із таблиці 1 та графіків (рис. 4), величина коефіцієнта поглинання енергії практично не залежить від частоти коливань [7].

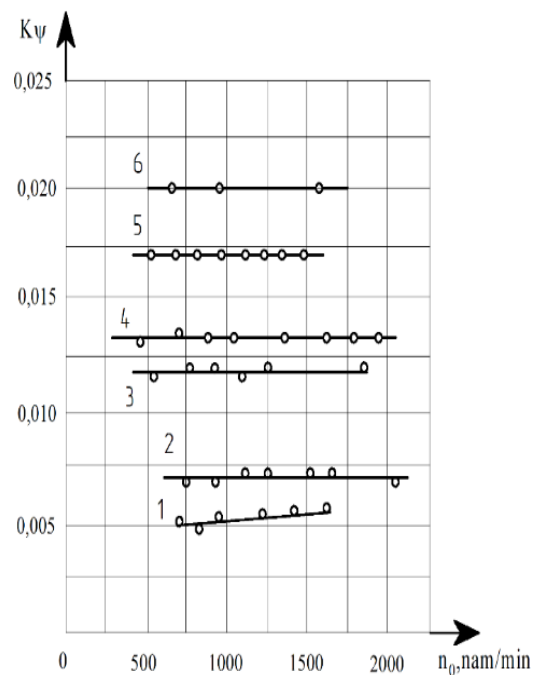


Рис. 4. Зміна коефіцієнта поглинання енергії від частоти циклів для деяких матеріалів: 1 – скло ($\sigma = 2350$ н/см²); 2 – нікель ($\sigma = 20100$ н/см²); 3 – молібден ($\sigma = 19900$ н/см²); 4 – монель-метал ($\sigma = 26000$ н/см²); 5 – нікелева сталь ($\sigma = 32500$ н/см²); 6 – мідь ($\sigma = 32500$ н/см²)

Для проведення експериментального визначення коефіцієнта поглинання енергії було використано вібротримачик з направленими гармонійними коливаннями (рис. 5, а). [8] На вібротримачику закріплена форма з бетонною сумішшю де встановлені датчики тиску та переміщення (рис. 5, б)

Методикою було передбачено запис із датчиків тиску та переміщень з наступним виділенням із віброграм одного періоду коливань (рис. 5, в) та наступною будовою петлі гістерезису (рис. 5, г). Була побудована серія таких петель гістерезису та одночасна фіксація їх на екрані (рис. 6).

Таблиця 1. Коефіцієнт поглинання Ψ при різних частотах для деяких матеріалів

Сталь марки Ст3		Сосна		Залізобетон		Метод визначення Ψ
Частота, Гц	Ψ	Частота, Гц	Ψ	Частота, Гц	Ψ	
0,006	0,008–0,014	0,055	0,069	0,0055	0,27	По площі статичної петлі гістерезису
5	0,0135	7	0,105	5	0,32	По затухаючим власних коливань
173	0,013	128	0,105	29	0,35	По резонансній петлі гістерезису

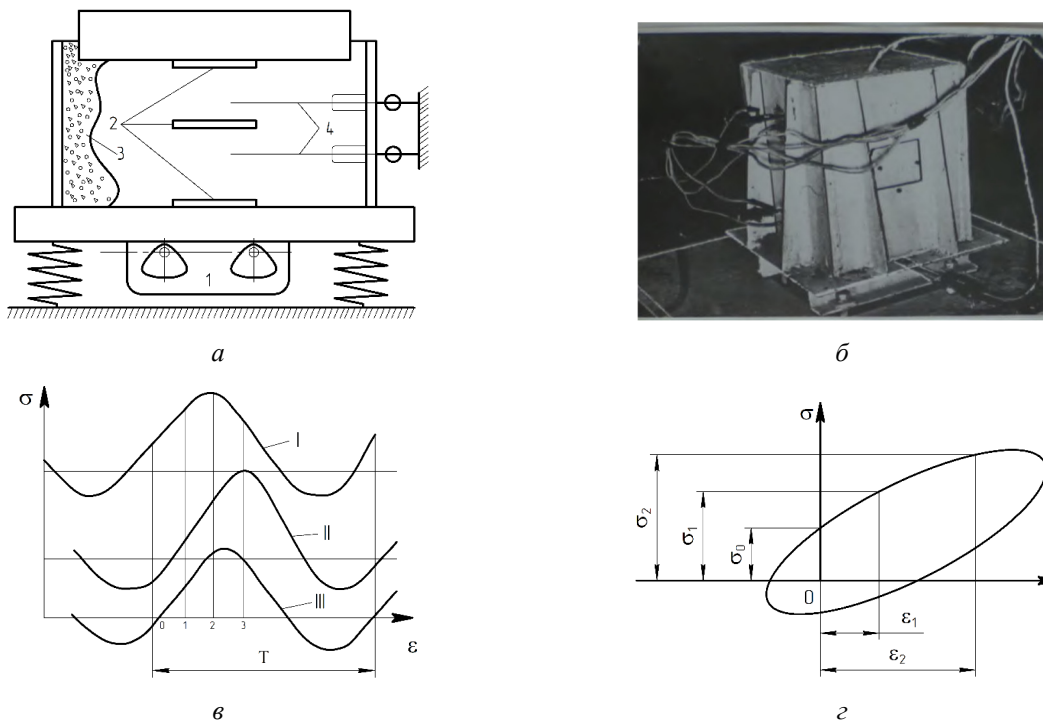


Рис. 5. Вібромайданчик з направленими гармонійними коливаннями: 1 – збудник коливань; 2 – датчики тиску; 3 – бетонна суміш; 4 – датчик переміщення; а – схема з датчиками; б – форма з сумішню; в – віброграма запису тиску II в бетонній суміші та двох переміщень I і III між датчиком тиску; з – методика побудови петлі гістерезису

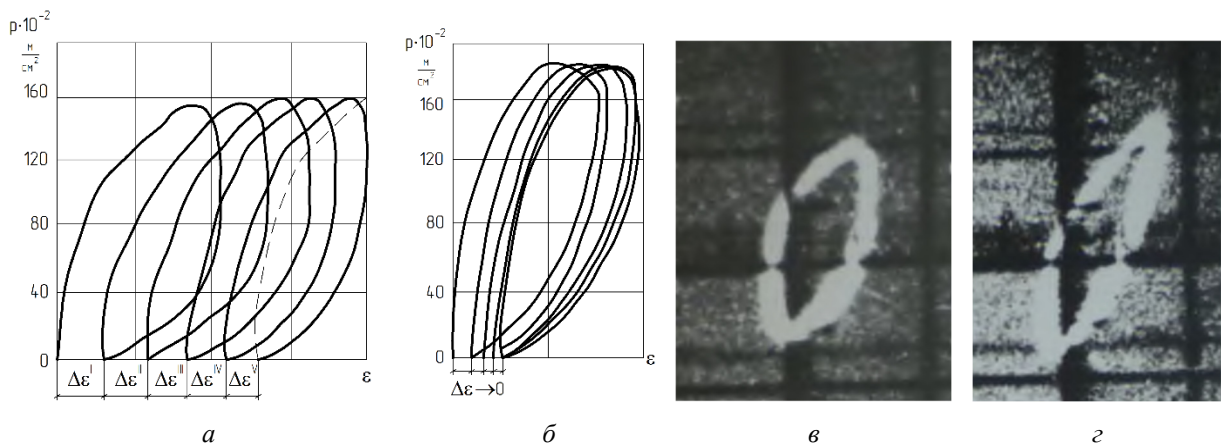


Рис. 6. Петлі гістерезису побудовані на різних етапах часу ущільнення бетонної суміші та зафіксовані на екрані на різних частотах коливань: а – $t = 30$ с; б – $t = 63$ с; в – $f = 25$ гц; з – $f = 50$ гц.

Аналіз петель гістерезису, які побудовані та зафіксовані на екрані на різних частотах коливань засвідчують зміну форми та площі на різних етапах часу ущільнення бетонної суміші. У початковий процес ущільнення форма петлі є дуже складною. Вона не симетрична відносно центру, тому що опір бетонної суміші коливанням вібромайданчика при навантаженні та розвантаженні є різними. При навантаженні напружений стан середовища підвищується, а при розвантаженні знижується. У деяких випадках розвантаження не відразу відбувається за навантаженням, тобто такий стан підтримується протягом деякого часу.

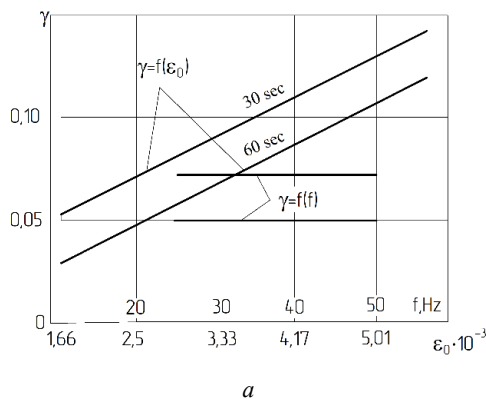
До параметрів циклічного навантаження відносяться максимальна величина напруження, швидкість зміни напруженого стану та загальний час, протягом якого суміш перебуває під дією навантаження. Під швидкістю зміни напруженого стану $v_{уз}$ розуміється перша похідна від напруження за часом:

$$v_{уз} = \frac{d\sigma}{dt}. \tag{12}$$

Якщо напруження в часі змінюється рівномірно, то швидкість зміни напруженого стану визначається як:

$$v_{уз} = \frac{\sigma}{t}. \tag{13}$$

З часом ущільнення бетонної суміші форма петлі гістерезису наближається до еліпсу, та її площа зменшується. В режимі, що є фіксованим із незмінними режимами і параметрами (сталий режим), зафіксовано практично незалежну площу від частоти коливань при однаковому силовому навантаженні. За результатами обробки результатів вимірювання виявлено, що в рамках виконаних досліджень коефіцієнт поглинання енергії змінюється в межах 0,04–0,20, залежить від амплітуди відносної деформації, складу бетонної суміші і за характером зміни не залежить від частоти коливань (рис. 7)



Виявлено, що для гармонійних коливань з частотою $\omega = 300\text{--}600 \text{ c}^{-1}$ оптимальна амплітуда коливань X_{opt} знаходиться в межах:

$$X_{opt} = \frac{(4-6)g}{\omega^2}, \tag{14}$$

де g – прискорення вільного падіння ($g = 9,8 \text{ м/с}$), а коефіцієнт опору γ може бути визначений за емпіричною залежністю:

$$\gamma = K_1 X_0 \pm K_2, \tag{15}$$

де коефіцієнти K_1 і K_2 приведені в таблиці 2.

Таблиця 2. Числові значення коефіцієнтів K_1 і K_2

Жорсткість суміші, Ж, с	K_1	$\pm K_2$
30–50	0,23	0,016–0,012
60–80	0,23	–(0,147–0,144)
90–110	0,1	–(0,010–0,0)

Дослідження фізичних аспектів розсіяння енергії за нелінійним законом навантаження

Нелінійний закон навантаження реалізується шляхом використання віброударної установки (рис. 8, а), внаслідок чого отримуємо різні значення переміщення і прискорення [9] (рис.8, б).

За такого режиму будуть мати різні відрізки періоду коливань віброударної установки:

$$T = t_1 + t_2,$$

де t_1 – частина періоду при переміщенні x_1 , а t_2 при x_2 .

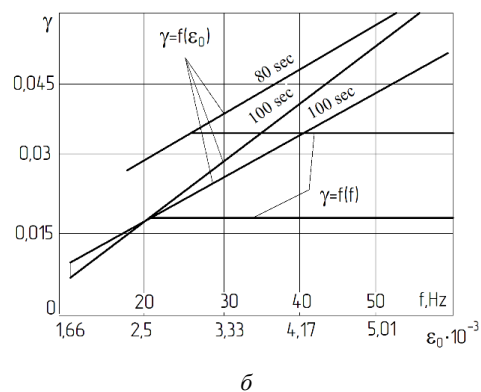


Рис. 7. Графіки зміни коефіцієнта поглинання енергії в залежності від амплітуди відносної деформації, частоти коливань та різної жорсткості бетонної суміші: а – жорсткість 30 та 60 с; б – жорсткість 80 та 100 с

Позначивши $K_a = t_1 / t_2$ і $\omega_{cp} = 2\pi / T$ – осереднене значення частоти; F_0 – амплітуда сили.

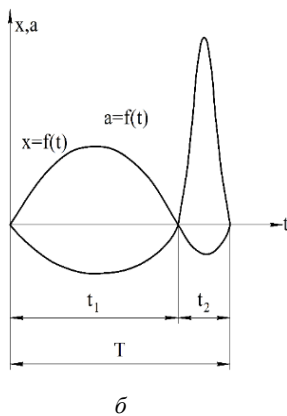
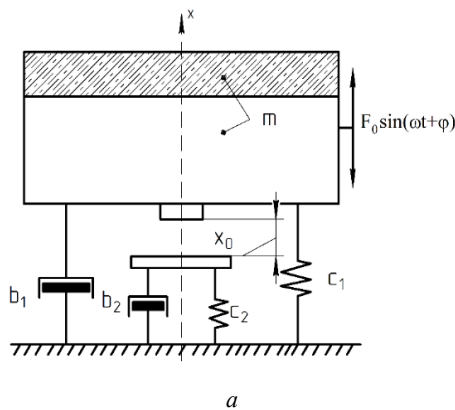


Рис.8. Схема віброударної установки (а) і характер зміни її переміщення і прискорення за період коливань (б): m – приведена маса віброударної установки, форми і бетонної суміші; x, x_0 – переміщення установки і зазор між формою і обмежником; c_1, c_2 – коефіцієнти пружності опору установки і обмежника коливань; b_1, b_2 – коефіцієнти розсіювання енергії опор установки і обмежника коливань.

Виходячи із характеру руху (рис.8, б) закон зміни переміщення на відповідних ділянках руху представлено у вигляді:

$$x(t) = \begin{cases} -x_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_1} t\right), & 0 \leq t \leq t_1; \\ x_2 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_2} t\right), & t_1 \leq t \leq t_2. \end{cases}$$

За прийнятої умови переміщення варто очікувати зміну напруження в бетонній суміші за таким же законом:

$$\sigma(t) = \begin{cases} \sigma_c \sin\left(\frac{\pi t}{t_1}\right), & 0 < t \leq t_1; \\ -\sigma_p \sin\left[\frac{\pi(t-t_1)}{T-t_1}\right], & t_1 < t \leq T. \end{cases} \quad (16)$$

Тоді співвідношення $\sigma_c \sin(\pi t / t_1) = \sigma_p \pi / (T - t_1)$, є зв'язком між напруженнями на відповідних ділянках:

$$\sigma_c = \sigma_p (1 - \kappa_t) / \kappa_t, \quad (17)$$

де коефіцієнт κ_t представляє собою асиметрію часу дії: $\kappa_t = t_1 / T$.

Для визначення деформації ε прийнемо закон зміни напруження у вигляді:

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t)(1 + i\gamma), \quad (18)$$

Тоді, використовуючи (18) можна записати вираз для зміни деформації за законом:

$$\varepsilon = \sigma(t) / E(1 + i\gamma) = \sigma(t)(1 - i\gamma) / E(1 + i\gamma), \quad (19)$$

яка із врахуванням (16) після нескладних перетворень представлена у вигляді:

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \frac{\sigma_c \sin(\pi t / t_1)}{E(1 + i\gamma^2)} - \frac{\gamma \sigma_p \cos(\pi t / t_1)}{E(1 + i\gamma^2)}, & 0 < t \leq t_1; \\ \frac{\gamma \sigma_p \cos[\pi(t - t_1) / (T - t_1)]}{E(1 + i\gamma^2)} - \frac{\sigma_c \sin[\pi(t - t_1) / (T - t_1)]}{E(1 + i\gamma^2)}, & t_1 < t \leq T. \end{cases} \quad (20)$$

Маючи вирази для напруження (16) і деформації (20) можна визначити і енергію на відповідних етапах ущільнення бетонної суміші за період T :

$$\Delta W = \int_0^T \sigma(t) \dot{\varepsilon}(t) dt = \int_0^{t_1} \sigma(t) \dot{\varepsilon}(t) dt + \int_{t_1}^T \sigma(t) \dot{\varepsilon}(t) dt. \quad (21)$$

Після підстановки виразів (16), (20) та знаходження інтегралів (21) отримуємо формулу для визначення енергії на процес ущільнення суміші.

$$\Delta W = \frac{\pi \sigma_c^2 \gamma}{2E(1 + \gamma^2)} \left[1 + (1 - \kappa_t)^2 / \kappa_t^2 \right]. \quad (22)$$

Формула (22) може бути використаною для будь якого середовища або матеріалу, яке володіє пружно-в'язкими властивостями і знаходиться під дією силового навантаження (рис.8, б). Ця формула визначає витрати енергії на одиницю об'єму матеріалу, враховує асиметрію навантаження і може слугувати енергетичним критерієм розсіювання енергії в матеріалах при динамічному їх навантаженні. Щодо статичного навантаження необхідно вилучити коефіцієнт асиметрії. Для систем з нелінійними коливаннями частотою $\omega = 105-157 \text{ c}^{-1}$ оптимальна амплітуда коливань (напіврозмах коливань):

– при частоті 105 c^{-1} :

$$X_{onm} = \frac{(1,8 - 2,25)g}{\omega^2}; \quad (23)$$

– при частоті 157 с⁻¹:

$$X_{onm} = \frac{(2 - 2,25)g}{\omega^2}. \quad (24)$$

Обговорення результатів дослідження фізичних аспектів розсіяння енергії в матеріалах і середовищах

Виконані дослідження засвідчують необхідність коректного врахування числових значень параметрів, якими є коефіцієнт опору b , що входить у рівняння руху (1), як в одномасових вібраційних системах, так і в інших рівняннях, описуючих рух вібраційних систем з дискретними параметрами. В системах з розподіленими параметрами використовується формула (22). Використання методу петель гістерезису в рамках виконаних досліджень дозволив отримати числові значення коефіцієнта поглинання енергії, який змінюється в межах 0,04–0,20 і залежить від амплітуди відносної деформації, складу бетонної суміші і за характером зміни не залежить від частоти коливань (рис. 7). Зафіксовані на екрані на різних частотах коливань засвідчують зміну форми петлі та площі на різних етапах часу ущільнення бетонної суміші. Це є свідченням, що коефіцієнт опору є змінним, та потребує уточнення формули (22). До параметрів циклічного навантаження відносяться максимальна величина напруження, швидкість зміни напруженого стану та загальний час, протягом якого суміш перебуває під дією навантаження. Використання та числове визначення швидкості зміни напруженого стану дозволить визначити амплітуду й частоту коливань та час на ущільнення робочого середовища. Також відкривається можливість створення системи ефективного управління процесом розподі-

лення енергії. Найбільш ефективним методом є додаткові експериментальні досліді по визначенню зміни енергії на всьому етапі зміни енергії того чи іншого технологічного процесу. Такі дослідження заплановані як продовження розглянутої теми на основі максимального визначення та врахування енергії, яка забезпечить ефективний процес ущільнення робочого середовища. Запропонована методика може бути успішно застосована в дорожньому будівництві для улаштування бетонних доріг, будівництво яких поступово розширюється в Україні.

Висновки

1. Обґрунтована та розроблена методика дослідження розсіяння енергії в матеріалах і середовищах на основі використання методу динамічної петлі гістерезису, застосування якого дозволила визначити коефіцієнт опору без апріорного прийняття функціональної залежності енергії від параметрів.

2. Досліджені фізичні аспекти розсіяння енергії в матеріалах і середовищах за лінійним законом навантаження та встановлені числові значення коефіцієнтів опору, які змінюються в межах 0,04–0,20.

3. Використанням методу петель гістерезису в рамках виконаних досліджень виявлено, що коефіцієнт поглинання енергії, який залежить від амплітуди відносної деформації, складу бетонної суміші і не залежить від частоти коливань.

4. Отримана аналітична залежність для визначення енергії на процес ущільнення суміші за нелінійним законом навантаження може бути використаною для будь якого середовища або матеріалу, яке володіє пружно-в'язкими властивостями і знаходиться під дією силового навантаження. Ця формула визначає витрати енергії ущільнення на одиницю об'єму матеріалу, враховує асиметрію навантаження і слугує енергетичним критерієм розсіяння енергії в матеріалах при динамічному їх навантаженні.

References

- [1] P.F. Ovchinnikov, *Vibrorheology*, Kyiv: Scie. thought, 1983.
- [2] G.S. Pisarenko, *Oscillations of Mechanical Systems Taking into Account the Imperfect Elasticity of Materials*, Kyiv: Scie. thought, 1970.
- [3] G.S. Pisarenko, A.P. Yakovlev and V.V. Matveev, *Vibration-absorbing properties of structural materials: a Handbook*, Kyiv: Scie. thought, 1971.
- [4] Ya.G. Panovko, *Fundamentals of Applied Theory of Oscillations and Impact*, Moscow: Mechanical engineering, 1976.
- [5] I. Bernyk, O. Luhovskyi and I. Nazarenko, "Effect Of Rheological Properties Of Materials On Their Treatment With Itrasonic Cavitation", *Materiali in Tehnologije*, 52(4), pp. 465–468, 2018. <https://doi.org/10.17222/mit.2017.021>
- [6] I. Nazarenko, et al., "Determination of the workflow of energy-saving vibration unit with polyphase spectrum of vibrations", *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, Vol 1, No 7 (103), pp. 43–49, 2020. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.0.184632>
- [7] E.S. Sorokin, *Dynamic calculation of load-bearing structures of buildings*, Moscow: Gosstroyizdat, 1956.
- [8] I.I. Nazarenko, *Vibration machines and processes of the budding industry: A guidebook*. Kyiv: КНУБА, 2007.

- [9] I. Nazarenko, *et al.*, “Determining the regions of stability in the motion regimes and parameters of vibratory machines for different technological purposes”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol 6, No 7 (108). pp. 71–79, 2020. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217747>

Investigation of physical aspects of energy dissipation in materials under static and dynamic loading

I.I. Nazarenko, A.V. Zaprivoda, A.Y. Bondarenko, M.M. Nesterenko, V.S. Sliusar

Abstract. *The research is carried out to determine the qualitative and quantitative picture of changes in energy scattering in specific materials and environments under different laws of their loading, processing and creation of new mixtures and materials. It was found that different methods are used to determine the dissipative characteristics, the assessment of which makes it difficult to assess the reliability of the results, as different assumptions and assumptions are accepted. The study of the physical aspects of energy scattering in materials and media is carried out according to linear and nonlinear load laws based on the use of hysteresis loop methods in transient and constant load regimes. It is found that the shape of the hysteresis loop depends to some extent on the law of change of load per cycle. The method of attenuating oscillations of energy absorption estimation by determining the logarithmic decrement of oscillations is used. According to the results of processing the measurement results, it is found that in the studies performed, the energy absorption coefficient varies in the range of 0.04-0.20, depending on the amplitude of relative deformation. which has elastically viscous properties and is under the action of force load. In physical terms, this formula determines the energy consumption per unit volume of material, takes into account the asymmetry of the load and can serve as an energy criterion for energy dissipation in materials under load.*

Keywords: *energy dissipation, stress, deformation, material, medium, parameters, hysteresis loop, oscillation decrement.*