

УДК 693.542.52-868

*І.І. Назаренко, д.т.н., професор КНУБА,  
Ю.О. Баранов, к.т.н., доцент КНУБА,  
В.А. Басараб, інженер*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ УЩІЛЬНЕННЯ СУМІШІ В УМОВАХ УДАРНО-ВІБРАЦІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ ДИНАМІЧНОЇ ПЕТЛІ ГІСТЕРЕЗИСУ

### Вступ. Постановка задач досліджень.

В умовах проектування ударно-вібраційних машин для ущільнення будівельних сумішей однією з найважливіших задач є оцінка характеру та величини енергії, що передається від робочого органу до середовища та визначення раціональних параметрів машини та середовища, що забезпечують даний процес. Основним критерієм ефективності роботи машини є максимальна передача енергії від робочого органу до середовища за умов мінімальних непродуктивних витрат енергії, мінімально можливої тривалості циклу, отримання виробу високої якості а також збереження високої надійності машини. Проте, слід зазначити, для представлення повної фізичної картини необхідно також врахувати крутизну фронту динамічного навантаження а також несиметричність динамічної петлі гістерезису відносно осей координат [4]. Для проведення досліджень використано метод динамічної петлі гістерезису (ДПГ) [4].

При проведенні досліджень у відповідності з методикою [1,2,3] реєструвались наступні параметри:

- амплітуда коливань шарів суміші.
- динамічний тиск в контактній зоні "форма-суміш" та в шарах суміші.

Вихідні дані [2]: вантажопідйомність лабораторної віброплощадки-200кг(робочий орган+форма-120кг, маса бетону-80кг), частота коливань- $\omega=20$ Гц, амплітуда коливань(напіввзмах)- $X=0,75$ мм.

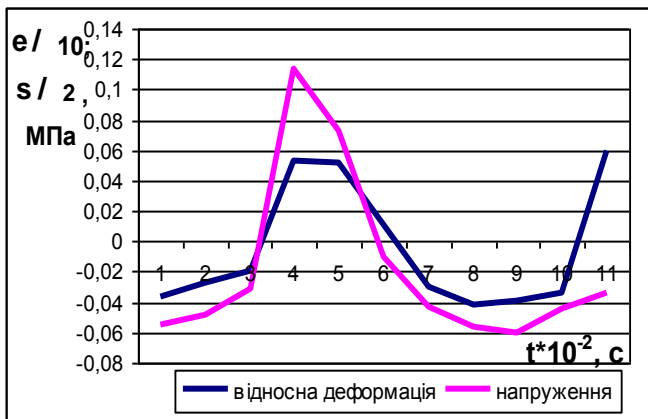


Рисунок1. Запис зміни напруження та відносної деформації за цикл ущільнення.

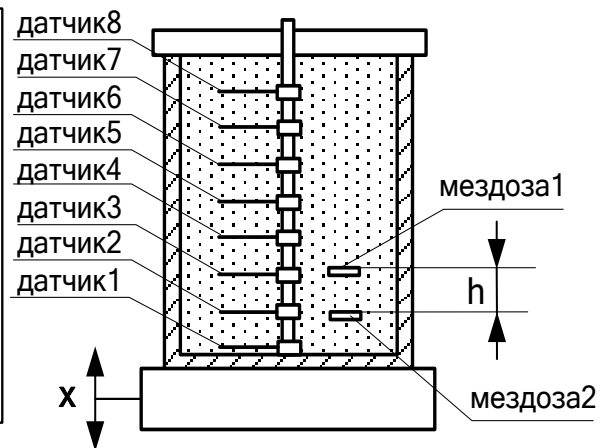


Рисунок2. Схема встановлення датчиків.

Встановлення датчиків тиску та переміщення в форму здійснювалось за схемою (рисунок2). Один датчик тиску (мездоза1) встановлювався на дні форми і закріплювався жорстко, інший датчик (мездоза2) встановлювався вільно на деякій висоті при завантаженні суміші. Датчики переміщення шарів суміші встановлювались на спеціальному, жорстко закріпленому в формі, штативі.

За отриманими значеннями напруження та відносної деформації побудовано динамічну петлю гістерезису (рисунок 3). Для аналізу отриманий графік умовно розділимо на ділянки: А-В, В-С та С-Д.

Ділянка А-В – відбувається випереджаючий ріст напруження по відношенню до відносної деформації, напруження  $\sigma$  досягає максимуму в точці В. На даному етапові відбувається плавне наростання тиску майже за лінійним законом (пружна деформація) з переходом в зону пластичної деформації.

Ділянка В-С – відбувається випереджаюче зростання відносної деформації по відношенню до напруження, відносна деформація  $\epsilon$  досягає максимуму в точці С. На даній ділянці відбувається перехід від етапу навантаження до розвантаження шару суміші.

Ділянка С-D – відбувається падіння напруження та відносної деформації, іде процес розвантаження.

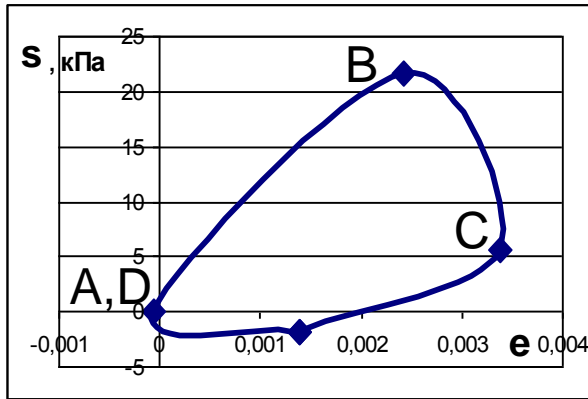


Рисунок 3. Динамічна петля гістерезису в кінці циклу ущільнення.

Слід зазначити, що в процесі віброущільнення відбувається зменшення площі ДПГ а також зміна її форми. На нашу думку, цей факт можна пояснити релаксаційними коливаннями тиску та відносної деформації з частотою відмінною від частоти коливань установки а також накладанням коливань форми. Оскільки площа петлі гістерезису є робота, що витрачається на ущільнення елементарного об'єму суміші, тому, стає зрозумілим, на початку циклу відбувається

активне поглинання віброенергії середовищем і, як наслідок, зміна площі ДПГ. Внаслідок проведених досліджень отримано результати запису показань датчиків для висоти суміші 1м.

Аналіз графіків вказує на неоднозначний характер руху суміші на різних етапах. Досліди проводились за умов вільного та фіксованого встановлення датчиків, тобто з можливістю руху датчика разом з сумішшю під час ущільнення або жорстке закріплення на штативі. На початковій стадії, було відмічено, відбувається синхронний рух суміші в одній фазі, зі збільшенням амплітуди по висоті. Далі, по мірі ущільнення характер руху шарів суміші змінюється – фіксується зсув фаз між показаннями датчиків а також протифазний рух суміші. За умов фіксованого встановлення датчиків ситуація виглядає дещо іншою: протифазний рух суміші більш виразний, більш того зсув фаз зафіксовано на різних висотах.

Зокрема, слід зазначити, досить різкий зсув фаз зафіксовано в умовах пошарового укладання суміші з подальшою вібрацією; очевидно за таких обставин більш істотною є різниця в поведінці шарів суміші на границях укладання – “ущільнена-неущільнена” суміш. Фрагменти робочих осцилограм для початкової та кінцевої стадій ущільнення приведено на на рисунках 4,5. Необхідно зазначити, що основні параметри середовища в умовах дії ударно-вібраційного навантаження отримано в роботі [5].

Будемо виходити з уявлення, що напруження в середовищі змінюється за законом:  $\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}) = E\epsilon + k\dot{\epsilon}$ . Оскільки бетонна суміш є середовищем з сильним затуханням, тому

запишемо хвильове рівняння у вигляді:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \beta \frac{\partial^3 U}{\partial x^2 \partial t} \quad (1)$$

Розв'язок рівняння (1) будемо знаходити у вигляді:  $U(x,t) = U_1 e^{k_1 x} + U_2 e^{k_2 (2H-x)}$ . (2)

Підставивши рішення (2) у вихідне рівняння, та провівши необхідні перетворення

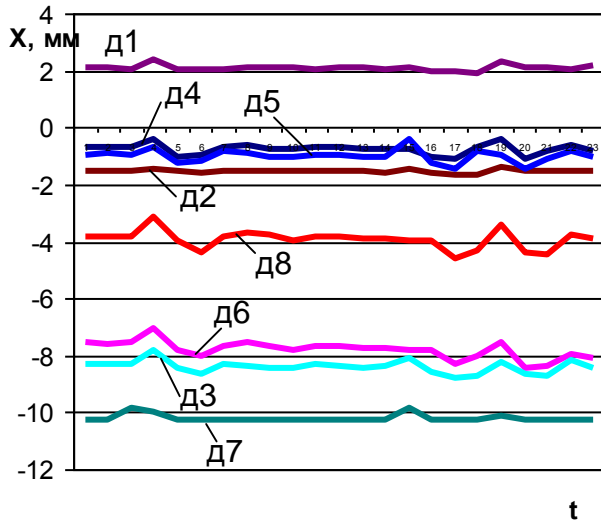


Рисунок4. Осцилограма показань датчиків переміщення шарів суміші на початку циклу ущільнення.

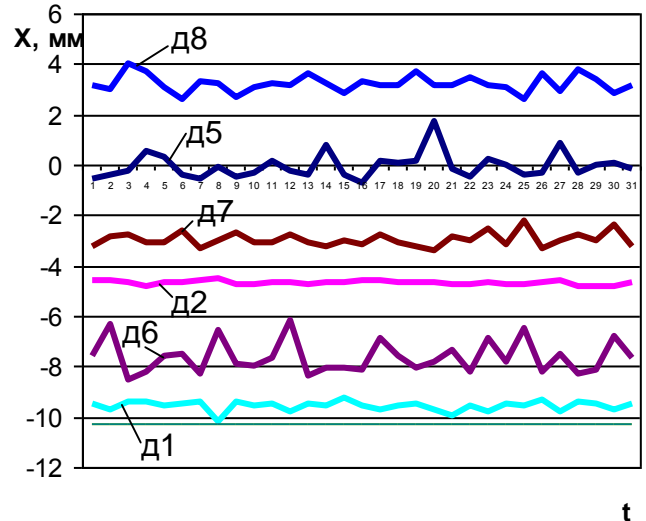


Рисунок5. Осцилограма показань датчиків переміщення шарів суміші в кінці циклу ущільнення.

отримаємо значення коефіцієнтів:  $k_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{\ddot{x}_0}{\dot{x}_0 \frac{\kappa_0}{\rho} - x_0 c^2}}$ , (3)

Коефіцієнти  $U_1$ ,  $U_2$  знаходимо за методикою [4]:  $U_1 = \frac{x_0 e^{-k_1 x}}{e^{k_1 x} + e^{-k_1 x}}$ ,  $U_2 = \frac{x_0 e^{k_1 x}}{e^{k_1 x} + e^{-k_1 x}}$ . (4)

Для того, щоб врахувати вплив середовища на робочий орган вібромашини необхідно в диференційні рівняння руху робочого органу підставити значення напруження в зоні контакту:

$$\sigma = E\varepsilon + \kappa\dot{\varepsilon} = E \frac{\partial U}{\partial x} + \kappa \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial t}. \quad (5)$$

Значення  $E$  було апроксимовано в попередніх дослідженнях за методами поліноміальної регресії та рядом Фур'є наступними залежностями:

$$E(t) = 0.856 - 1.187t + 0.396t^2 - 0.039t^3 - 8.055 \times 10^{-7} t^4 + 9.409 \times 10^{-5} t^5, \quad (6)$$

$$E(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^n (A_k \cos(k\omega t) + B_k \sin(k\omega t)). \quad (7)$$

Далі необхідно знайти значення коефіцієнта в'язкості  $\kappa$ .

Динамічну петлю гістерезису можна апроксимувати окремими ділянками за допомогою поліноміального ряду (ділянка А-В):

$$\sigma(\varepsilon) = -3 \cdot 10^8 \varepsilon^3 - 3 \cdot 10^6 \varepsilon^2 + 17631 \cdot \varepsilon + 1.045, \quad (8)$$

також апроксимуємо швидкість відносної деформації:

$$\dot{\varepsilon}(t) = -2 \cdot 10^{10} t^5 + 10^9 t^4 - 4 \cdot 10^7 t^3 + 628184 \cdot t^2 - 5112.2 \cdot t + 15.271. \quad (9)$$

Тоді вираз напруження можна представити як суму лінійної та нелінійної частини:

Лінійна частина -  $E\varepsilon = 1.045 + 17631 \cdot \varepsilon$ , нелінійна частина -  $\kappa\dot{\varepsilon} = -3 \cdot 10^8 \varepsilon^3 - 3 \cdot 10^6 \varepsilon^2$ . (10)

Поділивши один ряд на інший, знайдемо коефіцієнт  $\kappa$ :

$$\kappa = \frac{-3 \cdot 10^8 \varepsilon^3 - 3 \cdot 10^6 \varepsilon^2}{-2 \cdot 10^{10} t^5 + 10^9 t^4 - 4 \cdot 10^7 t^3 + 628184 \cdot t^2 - 5112.2 \cdot t + 15.271}. \quad (11)$$



Аналогічно можна знайти значення коефіцієнта в'язкості для кожної ділянки петлі гістерезису.

Площу петлі гістерезису, як суму ділянок стиснення та розтягу можна визначити за співвідношенням [4]:

$$S = \int_0^T \sigma(t) \dot{\varepsilon}(t) dt = \int_0^{\tau} \sigma(t) \dot{\varepsilon}(t) dt + \int_{\tau}^T \sigma(t) \dot{\varepsilon}(t) dt, \quad (12)$$

Провівши необхідні перетворення, отримуємо вираз для визначення площі петлі гістерезису:

$$S = \frac{\sigma_n^2 \gamma \pi}{2E_0(1+\gamma^2)} \left[ 1 + \frac{(1-\alpha)^2}{\alpha^2} \right], \quad (13)$$

З виразу (13) слідує, що площа петлі має дві складові:

$$S_{cm} = \frac{\sigma_n^2 \gamma \pi}{2E_0(1+\gamma^2)}, \quad S_p = \frac{\sigma_n^2 \gamma \pi}{2E_0(1+\gamma^2)} \frac{(1-\alpha)^2}{\alpha^2}. \quad (14)$$

Ефективність динамічного впливу буде суттєвішою в тому випадку в якому значення  $S_{cm}$  буде більшим. Проте, варто зазначити, що можливі варіанти вібровпливу з однаковими площами ділянок стиснення але з різною крутизною фронту навантаження.

Для оцінки впливу крутизни фронту навантаження розглянемо вираз миттєвої потужності [4]:

$$P_{\text{мит}} = \sigma(t) \dot{\varepsilon}(t) = dS/dt. \quad (15)$$

Тоді миттєва потужність на стиснення:

$$P_{\text{мит}}^{cm} = \frac{1}{\alpha T} \int_0^{\alpha T} \sigma(t) \dot{\varepsilon}(t) dt. \quad (16)$$

З виразу (16) слідує, що є можливість існування варіантів з постійною та змінною швидкостями навантаження  $\dot{\varepsilon}(t) = V_\varepsilon$ . Якщо  $V_\varepsilon = const$ , тоді:  $P_{\text{мит}}^{cm} = \frac{1}{\alpha T} V_\varepsilon \int_0^{\alpha T} \sigma(t) dt$ . (17)

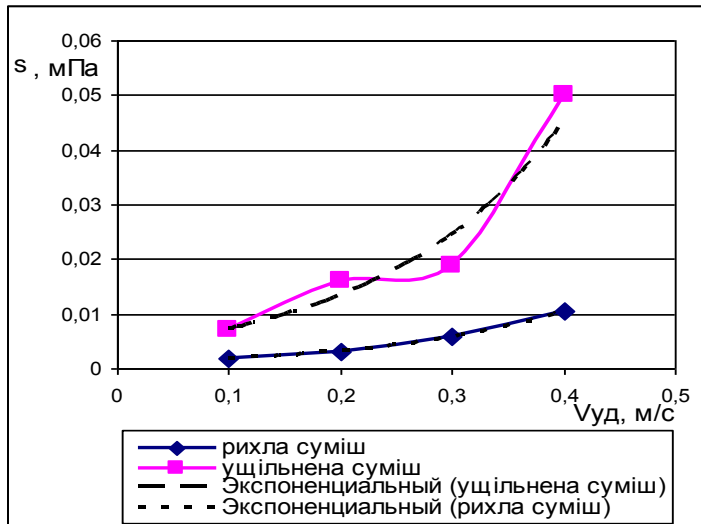
Логічно припустити, що ефективнішою буде та система в якій вища швидкість  $V_\varepsilon$ .

Далі можна створити узагальнений критерій, котрий порівнює обидві системи:

$$\frac{S_{cm_1} V_{\varepsilon_1}}{\alpha_1 T_1} = \frac{S_{cm_2} V_{\varepsilon_2}}{\alpha_2 T_2}. \quad (18)$$

Таким чином, якщо швидкість деформації  $V_\varepsilon = const$ , в такому разі ефективнішим буде той імпульс, в якого більшим є вираз (18). Якщо швидкість прикладання навантаження є величиною змінною, тоді, більш ефективною буде та система, котра має максимальне значення підінтегральної функції (17).

Слід зазначити, що величина та характер зміни наростаючої ділянки петлі гістерезису (ділянка А-В рисунок 3) залежить від швидкості зміни напруженого стану, який дорівнює відношенню напруження  $\sigma$  до часу дії  $t$ . За умови нескінченно повільного прикладання навантаження зберігається майже лінійна залежність між напруженням та деформацією до моменту зняття навантаження. Звідси слідує, і це підтверджується дослідами для ударної системи, що чим більша буде швидкість зміни напруженого стану середовища тим ширшою буде петля гістерезису [4]. Далі доцільно привести результати експериментальних досліджень закономірності зміни напруження середовища в залежності від швидкості прикладання навантаження (рисунок 6). Рівняння апроксимації можна представити трьома типами:

Рисунок 6. Графік залежності  $\sigma=f(v_{уд})$ .**Загальні висновки:**

В результаті проведення теоретико-експериментальних досліджень варто зазначити, що характер руху суміші в ударно-вібраційній системі є неоднозначним, відмічається значний зсув фаз між різними шарами суміші а також протифазний рух суміші. Також, слід вказати, що наведені вище викладки дозволяють описати процеси, що відбуваються в зоні контакту робочого органу та середовища а також оцінити їхню ефективність в умовах складного характеру навантаження. Аналіз динамічної петлі гістерезису в умовах дії ударно-вібраційного навантаження свідчить, що процес відбувається в умовах більш різкого навантаження суміші за одиницю часу, і, при цьому величини напружень та відносної деформації досягають більших значень у порівнянні з гармонічними режимами. Цим очевидно і пояснюється більш “вугловата” форма петлі. Запропонований метод дає можливість описати динамічну петлю гістерезису методом поліноміальної регресії для подальшого використання.

*Література*

1. Баранов Д.С, Карамзин В.Е. О методике измерения давления бетонной смеси на элементы форм. Сб. НИИЖБ Стальные формы для сборного железобетона. М., Стройиздат, 1966.
2. Баранов Ю.О Создание строительных ударно-вибрационных машин с электромагнитным приводом. Дисс. канд. техн. наук. К., 1994. – 150 с.
3. Баранов Ю.О, Клименко М.О, Басараб В.А Методика експериментальних досліджень взаємодії середовища з робочим органом ударно-вібраційної площадки. Техніка будівництва №11.К.: КНУБА, 2003.
4. Назаренко И.И. Прикладные задачи теории вибрационных систем, К.: І.С.Д.О, 1993.-216с.
5. Назаренко І.І, Баранов Ю.О, Басараб В.А Експериментальні дослідження взаємодії середовища з робочим органом електромагнітної ударно-вібраційної площадки. Техніка будівництва №14.К.: КНУБА, 2004.

Для рихлої суміші:

Експоненційна

$$\sigma(t) = 0.001e^{5.818t}$$

Степенева

$$\sigma(t) = 0.0272t^{1.2159}$$

Поліноміальна

$$\sigma(t) = 0.0818t^2 - 0.0123t + 0.0023$$

Для ущільненої суміші

Експоненційна

$$\sigma(t) = 0.004e^{6.063t}$$

Степенева

$$\sigma(t) = 0.1238t^{1.2753}$$

Поліноміальна

$$\sigma(t) = 0.5531t^2 - 0.1443t + 0.0177$$