

УДК 666.97.003.16

*М.П. Нестеренко, д. т. н., проф.**Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка***МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ КОЛИВАНЬ ПОДОВЖНИХ СТІНОК ФОРМИ НА УЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННОЇ СУМІШІ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНО НАПРАВЛЕНИХ КОЛИВАННЯХ ВІБРОУСТАНОВКИ**

**АНОТАЦІЯ.** *Визначено характер взаємодії подовжніх стінок форми з бетонною сумішшю при дії горизонтально направлених коливаннях віброустановки на основі аналітичного дослідження динамічної системи «віброустановка – бетонне середовище».*

**Ключові слова:** *вібробуджувач, віброустановка, дебаланс, форма, математична модель, пружна опора, бетонна суміш.*

**ANNOTATION.** *Character of cooperation longitudinal walls of form is certain with concrete mixture at the action of the horizontally directed vibrations vibroplatform on the basis of analytical research of the dynamic system «vibroplatforms – cement by concrete environment».*

**Key words:** *form, vibroexciter, vibration machine, mathematical model, unbalans, resilient support, cement concrete*

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** Досить широкого поширення при формуванні залізобетонних виробів набуло розроблене у ПолтНТУ імені Юрія Кондратюка вібраційне обладнання з просторовими коливаннями робочого органа [1], удосконалення котрого може проводитися на підставі аналітичних досліджень з врахуванням фізико-механічних характеристик ущільнюваного середовища і визначенням на їхній основі раціональних параметрів вібраційної площадки та режимів вібраційної дії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми.** У розрахунках вібраційного обладнання для формування залізобетонних виробів використовуються різні підходи до складення математичних моделей, про що свідчать публікації різних років. Відомі математичні моделі можна умовно розподілити на дві групи: плоскі динамічні моделі руху робочого органу, що розглядають рух у вертикальній або горизонтальній площині [2–7], та просторові – які розглядають рух робочого органа в просторі [8–9].

**Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Просторові коливання вібраційних площадок забезпечуються одиночним вібробуджувачес кругових коливань з вертикальним валом. При обертанні дебалансу виникає вимушуюча відцентрова сила кругової дії, вектор якої обертається у горизонтальній площині із кутовою швидкістю  $\omega$ . Складові сили по осях прямокутної системи координат OXYZ з початком в ц. м. коливальної системи збуджують трикомпонентні просторові коливання рухомої рами і встановленої на ній форми, які її днищем та бортами передаються бетонній суміші, забезпечуючи її ущільнення. У роботах [13–16] проведені аналітичні дослідження характеру взаємодії стінок форми з бетонною сумішшю вертикальною та горизонтальною складовими просторових коливань віброустановки при формуванні плоских залізобетонних виробів. Проте часто на таких віброустановках формують тонкостінні вироби з просторовою складною конфігурацією, найпоширеніші з них: бетонні лотки, ребристі плити покриттів, ребристі плити перекриттів, ригелі однополичкові та двохполичкові, балки таврові та двотаврові, ферми, колони двовіглові, опори, шахти ліфтів. Раціональні параметри віброплощадок для формування таких виробів можна установити шляхом визначення енергетичних витрат на основі вивчення закону руху даної динамічної системи, включаючи рух як рухомої рами віброустановки, подовжніх стінок форми, так і рух ущільнюваного середовища.

**Постановкою завдання.** Метою даної роботи є проведення аналітичних досліджень характеру взаємодії подовжніх стінок форми з бетонною сумішшю при дії горизонтально направленої складової просторових коливань віброустановки на основі аналітичного дослідження динамічної системи «віброустановка – бетонне середовище», які дозволять врахувати фізико-механічні характеристики ущільнюваного середовища і визначити раціональні параметри вібраційної площадки та режими вібраційної дії, при яких забезпечується ефективно ущільнення бетонних сумішей.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** При горизонтально направлених коливаннях віброустановки подовжні стінки форми, які розташовані на незначній відстані одна від одної, викликають у бетонній суміші дотичні напруження, які залежить від величини зсувних деформацій в ущільнюваному шарі. При формуванні тонкостінних конструкцій саме подовжні коливання стінок форми істотно впливають на ефективність ущільнення бетонних сумішей. Зміну дотичних напружень від зсувних деформацій можна в першому наближенні, як і раніше [13-14], описати наступною залежністю:

$$\tau = \eta_s \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x \partial t}, \quad (1)$$

де  $u$  – зсув бетонної суміші в горизонтальному напрямі;  
 $x$  – поточна координата в горизонтальному напрямі;  
 $\eta_s$  – коефіцієнт динамічної в'язкості бетонної суміші при зсувних деформаціях

[2]

$$\eta_s = \frac{a \rho l_1}{2(1 + \chi)}, \quad (2)$$

$a$  – фазова швидкість збудження в бетонній суміші;  
 $l_1$  – відстань між подовжніми бортами форми;  
 $\chi$  – коефіцієнт Пуассона.

Для визначення характеру взаємодії подовжніх стінок форми з ущільнюваною бетонною сумішшю при дії горизонтальної складової просторових коливань досліджуємо динамічну систему «віброустановка - бетонне середовище» (рисунок 1), в якій ущільнювана суміш представлена у вигляді системи з розподіленими параметрами. Віброустановка встановлена на основі за допомогою пружних опор і на її рухливу раму діє збудження у вигляді горизонтально направленої гармонійної сили  $Q \sin \omega t$ .

При вивченні взаємодії бетонної суміші з вертикальними стінками форми умовно не враховуватимемо взаємодію бетонної суміші з днищем форми. Тоді диференціальне рівняння руху ущільнюваної суміші у напрямі координати  $X$  за час  $t$  матиме вигляд

$$\eta_s \frac{\partial^3 u(x,t)}{\partial x^2 \partial t} - \rho \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = 0, \quad (3)$$

Розв'язок хвильового рівняння руху відшукуватимемо за наступних граничних умов:

$$-m \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial t^2} - c_2 u(0,t) + \eta_s F_3 \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial x \partial t} = -Q \sin \omega t; \quad (4)$$

$$u(0,t) = u(l_1,t), \quad (5)$$

де  $m$  – маса віброустановки;

$c_2$  – коефіцієнт жорсткості пружних опор у горизонтальному напрямі;

$Q$  – амплітуда вимушеної сили;

$\omega$  – кутова частота вимушених коливань;

$F_3$  – площа взаємодії подовжньої стінки форми з бетонною сумішшю.

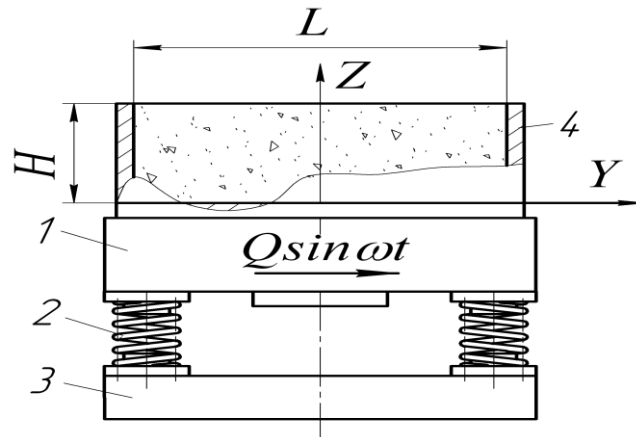


Рисунок 1. Розрахункова схема динамічної системи «віброустановка - бетонне середовище» при горизонтальному напрямленні коливань:  
1 – рухома рама; 2 – пружні опори; 3 – нижня рама;  
4 – форма з бетонною сумішшю.

Розв'язок хвильового рівняння коливань (2) представимо у вигляді уявної частини комплексної функції

$$u(x,t) = I_m [U(x)e^{i\omega t}], \quad (6)$$

де  $U(x)$  – комплексна амплітуда коливань.

Знак  $I_m$  надалі відкидатимемо.

Підставляючи вираз (6) у рівняння (2), отримаємо рівняння для визначення комплексної амплітуди коливань досліджуваної динамічної комплексна амплітуда коливань  $U(x)$ :

$$\frac{\partial^2 U(x)}{\partial x^2} + \frac{\rho\omega}{i\eta_c} U(x) = 0. \quad (7)$$

Розв'язок рівняння (7) знайдемо в наступному вигляді:

$$U(x) = D_1 e^{-\tilde{k}x} + D_2 e^{\tilde{k}x}, \quad (8)$$

де  $D_1$  і  $D_2$  – постійні інтегрування (комплексні амплітуди), визначувані граничними умовами (4) і (5);

$\tilde{k}$  – хвильове число, представлене в комплексній формі

$$\tilde{k} = \sqrt{\frac{\rho\omega}{i\eta_s}}. \quad (9)$$

Представимо хвильове число  $\tilde{k}$  у вигляді такої комплексної функції

$$\tilde{k} = k_2 - i\alpha_2 = \frac{\omega}{a_2} - i\alpha_2, \quad (10)$$

де  $k_2$  – хвильове число  $k_2 = \frac{\omega}{a_2}$ ;

$a_2$  – фазова швидкість поширення зсувних деформацій в ущільнюваному шарі;

$\alpha_2$  – коефіцієнт загасання збудження.

Прирівняємо вираз (9) і (10), піднесемо ліву і праву частини до квадрату  $i$ , виділяючи відповідно речову і уявну частини виразу, знайдемо

$$k_2 = \sqrt{\frac{\rho\omega}{2\eta_s}}; \quad (11)$$



$$a_2 = \sqrt{\frac{2\eta_s \omega}{\rho}} \quad (12)$$

На підставі залежностей (11) і (12) вираз(8) перетвориться до наступного вигляду:

$$U(x) = D_1 e^{-\alpha_2 + i k_2 x} + D_2 e^{(\alpha_2 + i k_2)x} \quad (13)$$

Використовуючи вирази (6) і (13), знайдемо розв'язок хвильового рівняння (2) в наступному вигляді:

$$u(x,t) = [D_1 e^{-\alpha_2 + i k_2 x} + D_2 e^{(\alpha_2 + i k_2)x}] e^{i\omega t} \quad (14)$$

Підставляючи отримане рішення (14) в граничну умову (5), знайдемо співвідношення між комплексними амплітудами  $D_1$  і  $D_2$ :

$$D_1 = D_2 \frac{e^{(\alpha_2 + i k_2)l_1 - 1}}{1 - e^{-(\alpha_2 + i k_2)l_1}} \quad (15)$$

Підставляючи отриману залежність (15) у вираз (14), отримаємо розв'язок рівняння (2) в такому вигляді:

$$u(x,t) = D_2 \frac{e^{(\alpha_2 + i k_2)l_1 - x} + e^{(\alpha_2 + i k_2)x} - e^{-(\alpha_2 + i k_2)l_1 - x} - e^{-(\alpha_2 + i k_2)x}}{1 - e^{-(\alpha_2 + i k_2)l_1}} \times e^{i\omega t} \quad (16)$$

Звідси, для хвилі що поширюється в позитивному напрямі, знайдемо розв'язок хвильового рівняння (2) у вигляді наступної комплексної функції

$$u(x,t) = D_2 \frac{e^{(\alpha_2 + i k_2)l_1 - x} + e^{(\alpha_2 + i k_2)x}}{1 - e^{-(\alpha_2 + i k_2)l_1}} e^{i\omega t} \quad (17)$$

Підставляючи вираз (17) у граничну умову (4), отримаємо вираз для визначення комплексної амплітуди  $D_2$

$$D_2 \left[ (c_2 - m\omega^2) - \eta_s \omega k_2 F_3 \frac{e^{(\alpha_2 + i k_2)l_1 - 1}}{e^{(\alpha_2 + i k_2)l_1 + 1}} + i\eta_s \omega \alpha_2 F_3 \frac{e^{(\alpha_2 + i k_2)l_1 - 1}}{e^{(\alpha_2 + i k_2)l_1 + 1}} \right] = \frac{Q[1 - e^{-(\alpha_2 + i k_2)l_1}]}{e^{(\alpha_2 + i k_2)l_1 + 1}} \quad (18)$$

Замінімо показникові функції, що стоять в квадратних дужках виразу(18), на тригонометричні функції, отримаємо:

$$D_2 \left\{ (c_2 - m\omega^2) - \eta_s \omega F_3 (k_2 - i\alpha_2) \frac{[e^{2\alpha_2 l_1} \cos(k_2 l_1) - 1] + i \sin(k_2 l_1)}{[e^{2\alpha_2 l_1} \cos(k_2 l_1) + 1] + i \sin(k_2 l_1)} \right\} = \frac{Q[1 - e^{-(\alpha_2 + i k_2)l_1}]}{e^{(\alpha_2 + i k_2)l_1 + 1}} \quad (19)$$

Перемножуючи у фігурних дужках виразу (19) чисельники і знаменники комплексних функцій на комплексні функції, спряжені показниковим функціям, що стоять в знаменниках, отримаємо:

$$D_2 \left\{ (c_2 - m\omega^2) - \eta_s \omega k_2 F_3 \frac{(e^{2\alpha_2 l_1} - 1) \cos^2(k_2 l_1)}{[e^{\alpha_2 l_1} \cos(k_2 l_1) + 1]^2 + \sin^2(k_2 l_1)} - \frac{2\eta_s \omega \alpha_2 F_3 \sin(k_2 l_1)}{[e^{\alpha_2 l_1} \cos(k_2 l_1) + 1]^2 + \sin^2(k_2 l_1)} - \frac{2i\eta_s \omega k_2 F_3 \sin(k_2 l_1)}{[e^{\alpha_2 l_1} \cos(k_2 l_1) + 1]^2 + \sin^2(k_2 l_1)} + \frac{i\eta_s \omega \alpha_2 F_3 (e^{2\alpha_2 l_1} - 1) \cos^2(k_2 l_1)}{[e^{\alpha_2 l_1} \cos(k_2 l_1) + 1]^2 + \sin^2(k_2 l_1)} \right\} = \frac{Q \cdot [1 - e^{-(\alpha_2 + i k_2)l_1}]}{e^{(\alpha_2 + i k_2)l_1 + 1}} \quad (20)$$

Аналіз виразів, що стоять у фігурних дужках показує, що вираз  $\eta_s \omega F_3 \frac{k_2 (e^{2\alpha_2 l_1} - 1) \cos^2(k_2 l_1) + 2\alpha_2 \sin(k_2 l_1)}{[e^{\alpha_2 l_1} \cos(k_2 l_1) + 1]^2 + \sin^2(k_2 l_1)}$  є інерційною силою бетонної суміші, а вираз

$i\eta_s \omega F_3 \frac{2k_2 \sin(k_2 l_1) + \alpha_2 (e^{2\alpha_2 l_1} - 1) \cos^2(k_2 l_1)}{[e^{\alpha_2 l_1} \cos(k_2 l_1) + 1]^2 + \sin^2(k_2 l_1)}$  – силою непружного опору. При цьому приведена

маса бетонної суміші при її взаємодії з подовжніми стінками форми може бути визначена з наступної залежності:

$$m_\tau = \eta_s F_3 \frac{k_2 (e^{2\alpha_2 l_1} - 1) \cos^2(k_2 l_1) + 2\alpha_2 \sin(k_2 l_1)}{\omega \cdot \{ [e^{\alpha_2 l_1} \cos(k_2 l_1) + 1]^2 + \sin^2(k_2 l_1) \}}, \quad (21)$$

а коефіцієнт непружного опору бетонної суміші при зсувних деформаціях, що створюються подовжніми стінками форми, з наступного виразу:

$$b_\tau = \eta_s F_3 \frac{2k_2 \sin(k_2 l_1) + \alpha_2 (e^{2\alpha_2 l_1} - 1) \cos^2(k_2 l_1)}{[e^{\alpha_2 l_1} \cos(k_2 l_1) + 1]^2 + \sin^2(k_2 l_1)}. \quad (22)$$

Використовуючи вирази (21) і (22), визначимо з отриманої залежності (20) значення комплексної амплітуди  $D_2$ :

$$D_2 = \frac{Q \cdot [1 - e^{-\alpha_2 + i k_2 l_1}]}{[e^{\alpha_2 + i k_2 l_1} + 1] \{ [c_2 - (m + m_\tau) \omega^2] + i b_\tau \omega \}}. \quad (23)$$

Перемножимо чисельник і знаменник виразу (23) на комплексну функцію, спряжену комплексній функції, що знаходиться у фігурних дужках. Отримаємо:

$$D_2 = \frac{Q \cdot [1 - e^{-\alpha_2 + i k_2 l_1}] \{ [c_2 - (m + m_\tau) \omega^2] - i b_\tau \omega \}}{[e^{\alpha_2 + i k_2 l_1} + 1] \{ [c_2 - (m + m_\tau) \omega^2]^2 + b_\tau^2 \omega^2 \}}. \quad (24)$$

Підставляючи вираз (24) у залежність (17), знайдемо розв'язок хвильового рівняння (2), що задовольняє граничним умовам (4) і (5):

$$u(x, t) = \frac{Q \cdot [e^{(\alpha_2 + i k_2)(l_1 - x)} + e^{(\alpha_2 + i k_2)x}] \{ [c_2 - (m + m_\tau) \omega^2] - i b_\tau \omega \}}{[e^{\alpha_2 + i k_2 l_1} + 1] \{ [c_2 - (m + m_\tau) \omega^2]^2 + b_\tau^2 \omega^2 \}} \times e^{i \omega t}. \quad (25)$$

Замінімо у виразі (25) комплексні показникові функції комплексними тригонометричними функціями. Отримаємо:

$$\begin{aligned} u(x, t) = Q & \left\{ [e^{\alpha_2(l_1 - x)} \cos k_2(l_1 - x) + i \sin k_2(l_1 - x)] + \right. \\ & + e^{\alpha_2 x} [\cos k_2 x + i \sin k_2 x] \left. \right\} / \left\{ [1 + e^{\alpha_2 l_1} \cos k_2 l_1] + i e^{\alpha_2 l_1} \sin k_2 l_1 \right\} \times \\ & \times \{ [c_2 - (m + m_\tau) \omega^2]^2 + b_\tau^2 \omega^2 \} \times \\ & \times \{ [c_2 - (m + m_\tau) \omega^2] - i b_\tau \omega \} (\cos \omega t + i \sin \omega t). \end{aligned} \quad (26)$$

Перемножаючи чисельник і знаменник виразу (26) на комплексну функцію, спряжену комплексній функції, що стоїть в знаменнику цього виразу, і потім, виділяючи з отриманого виразу уявну частину комплексної функції, отримаємо після складних перетворень розв'язок хвильового рівняння коливань (2), яке задовольняє граничним умовам (3) і (4) та описує коливання подовжніх стінок форми, в такому вигляді

$$\begin{aligned} u(x, t) = & \frac{Q}{(1 + 2e^{\alpha_2 l_1} \cos k_2 l_1 + e^{2\alpha_2 l_1}) \sqrt{[c_2 - (m + m_\tau) \omega^2]^2 + b_\tau^2 \omega^2}} \times \\ & \times \left\{ \{ e^{\alpha_2(l_1 - x)} [\cos k_2(l_1 - x) + e^{\alpha_2 l_1} \cos k_2 x] + \right. \\ & e^{\alpha_2 x} [\cos k_2 x + e^{\alpha_2 l_1} \cos k_2(l_1 - x)] \} \times \\ & \times \sin(\omega t - \phi_2) + \{ e^{\alpha_2(l_1 - x)} [\sin k_2(l_1 - x) - e^{\alpha_2 l_1} \sin k_2 x] + \\ & \left. + e^{\alpha_2 x} [\sin k_2 x - e^{\alpha_2 l_1} \sin k_2(l_1 - x)] \} \cos(\omega t - \phi_2) \right\}, \end{aligned} \quad (27)$$

де  $\phi_2$  – кут зсуву фаз між амплітудою вимушуючої сили і переміщенням,

$$\phi_2 = \arctg \frac{b_\tau \omega}{c_2 - (m + m_\tau) \omega^2 + b_\tau^2 \omega^2}. \quad (28)$$



Аналіз отриманого виразу (27) показує, що цей вираз описує в загальному вигляді коливання даної динамічної системи, тобто при  $0 < x < l_1$  воно описує рух бетонної суміші, а при  $x=0$  і  $x=l_1$  – коливання подовжніх стінок форми віброустановки

$$u(0,t) = u(l_1,t) = \frac{Q}{\sqrt{[c_2 - (m + m_\tau)\omega]^2 + b_\tau^2 \omega^2}} \sin(\omega t - \phi_2) = A_2 \sin(\omega t - \phi_2). \quad (29)$$

Після перетворень виразу (27) отримаємо залежність, зручну для аналізу і моделювання на ПЕОМ:

$$u(x,t) = \frac{A_2 \{ e^{\alpha_2(l_1-x)} \sin[\omega t - \phi_2 - \theta_1(x)] + e^{\alpha_2 x} \sin[\omega t - \phi_2 - \theta_2(x)] \}}{\sqrt{(1 + 2e^{\alpha_2 l_1} \cos k_2 l_1 + e^{2\alpha_2 l_1})}}, \quad (30)$$

де  $\theta_1(x)$  і  $\theta_2(x)$  – кути зсуву фаз;

$$\theta_1(x) = \arctg \frac{\sin k_2(l_1 - x) - e^{\alpha_2 l_1} \sin k_2 x}{\cos k_2(l_1 - x) + e^{\alpha_2 l_1} \cos k_2 x}, \quad (31)$$

$$\theta_2(x) = \arctg \frac{\sin k_2 x - e^{\alpha_2 l_1} \sin k_2(l_1 - x)}{\cos k_2 x + e^{\alpha_2 l_1} \cos k_2(l_1 - x)}. \quad (32)$$

Дотичні напруження, які виникають під вібраційним впливом в ущільнюваній бетонній суміші, при зсувних деформаціях викликаних горизонтальними коливаннями подовжніх бортів форми, визначаються при підстановці виразу (27) в рівність (1):

$$\begin{aligned} \tau(x,t) = \eta_s \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x \partial t} = & \frac{A_2 \eta_s \omega \sqrt{\alpha_1^2 + k_1^2}}{\sqrt{(1 + 2e^{\alpha_2 l_1} \cos k_2 l_1 + e^{2\alpha_2 l_1})}} \times \\ & \times \left\{ e^{\alpha_2(l_1-x)} \{ [\cos k_2(l_1-x) + e^{\alpha_2 l_1} \cos k_2 x] \sin(\omega t - \phi_3) + \right. \\ & + [\sin k_2(l_1-x) - e^{\alpha_2 l_1} \sin k_2 x] \cos(\omega t - \phi_3) \} - \\ & - e^{\alpha_2 x} \{ [\cos k_2 x + e^{\alpha_2 l_1} \cos k_2(l_1-x)] \sin(\omega t - \phi_3) + \\ & \left. + [\sin k_2 x - e^{\alpha_2 l_1} \sin k_2(l_1-x)] \cos(\omega t - \phi_3) \right\}, \quad (33) \end{aligned}$$

де  $\phi_3 = \phi_2 + \arctg \frac{\alpha_2}{k_2}$ .

Після перетворень виразу (33) отримаємо залежність, зручну для аналізу і моделювання на ПЕОМ:

$$\tau(x,t) = \eta_s \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x \partial t} = A_2 \eta_s \omega \sqrt{\alpha_1^2 + k_1^2} \times \{ e^{\alpha_2(l_1-x)} \sin[\omega t - \phi_3 - \theta_1(x)] - e^{\alpha_2 x} \sin[\omega t - \phi_3 - \theta_2(x)] \}. \quad (34)$$

При цьому напруження, що виникають біля подовжніх бортів форми, визначаються з наступного виразу:

$$\tau(0,t) = \tau(l_1,t) = A_2 \eta_s \omega \sqrt{\alpha_1^2 + k_1^2} (e^{\alpha_2 l_1} - 1) \sin[\omega t - \phi_3 - \theta_1(0)], \quad (35)$$

де  $\theta_1(0) = \arctg \frac{\sin k_2 l_1}{\cos k_2 l_1 + e^{\alpha_2 l_1}}$ .

### Висновки

1. Отримані теоретичні залежності дозволяють встановити закон руху бетонної суміші і віброустановки, визначити основні параметри віброустановки і раціональні режими вібраційної дії на бетонну суміш залежно від геометричних розмірів і конфігурації формованого виробу.

2. На основі теоретичних досліджень динамічної системи «віброустановка – ущільнюванне», в якій остання представлена у вигляді системи з розподіленими



параметрами, розроблена фізико-механічна модель, яка дозволяє досить точно визначити дисипативні й інерційні сили, що діють з боку суміші на подовжні борти форми при горизонтально направлених коливаннях. Визначені дотичні напруження, що виникають у бетонній суміші при її взаємодії з подовжніми бортами форми.

3. Запропоновані теоретичні залежності є основою для розробки і проектування віброплощадок і дебалансних віброзбуджувачів коливань призначених для формування просторових залізобетонних конструкцій.

### *Література*

1. Нестеренко, М. П. Вібраційні площадки з просторовими коливаннями для виготовлення залізобетонних виробів широкої номенклатури / М. П. Нестеренко // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ. – 2005. – Вип. 16. – С. 177 – 181.
2. Ахвердов И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат. – 1981. – 464 с.
3. Гусев, Б. В. Вибрационная технология бетона / Б. В. Гусев, В. Г. Зазимко. – К.: Будівельник. – 1991. – 160 с.
4. Десов, А. Е. Вибрированный бетон / А. Г. Десов. – М.: Госстройиздат. – 1956. – 230 с.
5. Гольдштейн, Б. Г. Глубинные вибраторы для уплотнения бетона / Б. Г. Гольдштейн, Л. П. Петрунькин. – М.: Машиностроение. – 1966. – 169 с.
6. Овчинников П. Ф. Виброреология. / П. Ф. Овчинников. – К.: Наукова думка. – 1983. – 272 с.
7. Сивко, В. И. Основы механики вибрируемой бетонной смеси / В. И. Сивко. – К.: Высш. шк., 1987. – 168 с.
8. Олехнович, К. А. Исследования характера многокомпонентных колебаний малошумных виброплощадок / К. А. Олехнович, Ю. И. Виноградов. – Полтава: ПИСИ. – 1980. – 13 с.
9. Орисенко О. В. Дослідження просторового руху робочого органа вібраційної машини для формування трубчастих залізобетонних виробів / О. В. Орисенко, М. П. Нестеренко // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ. – 2000. – Вип. 6, Ч. 1. – С. 172 – 175.
10. Маслов, А. Г. Вибрационные машины и процессы в дорожном строительстве / А. Г. Маслов, В. М. Пономарь // К.: Будівельник, 1985. – 128 с.
11. Назаренко, І. І. Вібраційні машини і процеси будівельної індустрії: Навчальний посібник / І. І. Назаренко. – К.: КНУБА. – 2007. – 230 с.
12. Файвусович, А. С. Реологические свойства бетонных смесей при ударных и ударно-вибрационных воздействиях / А. С. Файвусович, Ю. А. Зубов // Изв. вузов. Стр-во и архитектура, 1981, № 11, – С. 68 – 71.
13. Нестеренко, М. П. Дослідження характеру взаємодії віброплощадки з цементобетонною сумішшю при дії вертикально направленої складової просторових коливань віброплощадки / М. П. Нестеренко // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ. Випуск 3 (25), Т. 1. 2009. – С. 136 – 142.
14. Нестеренко, М. П. Дослідження характеру взаємодії вертикальних стінок форми з цементобетонною сумішшю при дії горизонтальної складової просторових коливань віброплощадки / М. П. Нестеренко // Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління №4 (26). – 2009. – С. 153-158.
15. Нестеренко, М. П. Дослідження зміни коефіцієнта приєднаної маси цементобетонної суміші при горизонтальних коливаннях залежно від її властивостей та умов формування виробів / М. П. Нестеренко // Науковий вісник будівництва. Харків: ХДТУБА-ХОТВ АБУ, № 61. – 2010. – С. 184 – 191.
16. Нестеренко, М. П. Визначення коефіцієнта приєднаної маси цементобетонної суміші при вертикальних коливаннях залежно від властивостей та умов формування виробів / М. П. Нестеренко // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ. Випуск 1 (26). – 2010. – С. 78 – 85.