

## ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧОГО РЕЖИМУ ВІБРОПЛОЩАДКИ НА СТАДІЇ ФОРМУВАННЯ БІЧНИХ СТІНОК БЕТОННОГО ЛОТКА

*Виконано аналітичні дослідження робочого режиму віброплощадки на етапі формування бічних стінок бетонного лотка без урахування верхнього шару бетонної суміші.*

**Ключові слова:** бетонна суміш, віброплощадка, віброзбуджувач, дебаланс, просторові коливання, пружна опора.

**Постановка проблеми.** У сучасних умовах будівництва залізобетонні вироби широко використовуються. Значно поширюється використання просторових бетонних та залізобетонних виробів складної форми, прикладом котрих можуть бути бетонні лотки. Вони знайшли застосування як при спорудженні теплотрас, так і при будівництві трубопроводів різноманітного призначення. Канали, виконані з бетонних лотків, можуть прокладатися як у звичайних ґрунтах, так і в ґрунтах з особливими характеристиками, наприклад у ґрунтах просадного типу, в умовах наявності ґрунтових вод, у районах із високою сейсмічною активністю. Крім того, бетонні лотки загального призначення також використовуються для установки в пішохідних зонах, на автостоянках, під'їзних шляхах, у спортивних спорудах тощо. Такі вироби формують на інерційних віброплощадках з вертикально направленими коливаннями, які забезпечують ефективне формування бетонних і залізобетонних виробів із жорстких бетонних сумішей, але дуже енергоємні та складні за конструкцією, особливо зібільшенням їхньої вантажопідйомності [1].

**Аналіз останніх досліджень.** Доведено [2], що досить ефективними при формуванні бетонних виробів є віброплощадки з використанням одно-, дво- та полічастотної багатокомпонентної вібрації.

Інерційні віброплощадки з низькочастотними горизонтально направленими коливаннями [3 – 4] прості за конструкцією, менш енергоємні, проте забезпечують формування плоских виробів лише з пластичних бетонних сумішей. Ці віброплощадки можуть бути застосовані для формування бетонних і залізобетонних виробів із просторовою формою конструкції. Проте залишається відкритим питання про використання різноспрямованої вібраційної дії на ущільнюване середовище. Не розв'язано питання [5 – 6] щодо обґрунтування режимів та напряму вібраційної дії при формуванні просторових бетонних і залізобетонних виробів складної форми

**Метою роботи** є дослідження динамічної системи «віброплощадка – бетонне середовище», на яку діє збудження у вигляді горизонтально направленої вимушуючої сили, на стадії формування бічних стінок бетонного лотка без урахування верхнього шару бетонної суміші.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для визначення закону руху і основних параметрів віброплощадки для формування бетонного лотка досліджуємо динамічну систему «віброплощадка – бетонне середовище» (рис. 1), на яку діє збудження у вигляді горизонтально направленої вимушуючої сили, прикладеної нижче від центра мас коливальної системи.

На початку формування виробів уздовж поздовжніх бортів 7 форми бетоноукладачем укладають валком бетонну суміш 8, яка частково заповнює простір між поздовжніми бортами 7 і осердям 6. Вмикають привідний електродвигун, який за допомогою клинопасової передачі обертає дебалансний вал віброзбуджувача коливань 4 з кутовою швидкістю  $\omega$ . При цьому вимушуюча сила  $Q$  викликає коливання рухомої рами 1 разом із формою в горизонтальному напрямі й одночасно крутильні коливання відносно центра мас  $O$  коливальної системи. На бетонну суміш діє різноспрямована вібрація у вигляді одночасно прикладених кругових і крутильних коливань, завдяки якій у віброваній суміші поряд із нормальними виникають зсувні деформації.

При такій вібраційній дії тривалістю 10 – 15 с суміш переходить у тиксотропний стан і повністю заповнює простір між поздовжніми бортами 7 та осердям 6, утворюючи бічні борти лотка. Після закінчення попереднього ущільнення вимикають віброзбудувач коливань, укладають бетонну суміш рівномірно по всій поверхні формованого виробу й остаточно її ущільнюють.

Колівання цієї динамічної системи відносно координатних осей  $X$  та  $Y$ , що проходять відповідно у поздовжньому й поперечному напрямках через центр мас  $O$  динамічної системи, можна описати такою системою рівнянь:

$$\begin{aligned}
 m + m_{\tau} \frac{d^2 x_1}{dt^2} + b_1 + b_{\tau} \frac{dx_1}{dt} + c_1 x_1 &= Q \cos \omega t; \\
 m + m_{\tau \partial 2} \frac{d^2 y_1}{dt^2} + b_2 \frac{dy_1}{dt} + c_2 y_1 &= Q \sin \omega t; \\
 I_x + I_1 \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} + n_1 \frac{d\varphi_1}{dt} + \xi_1 \varphi_1 &= M_1 \sin \omega t; \\
 I_y + I_2 \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} + n_2 + n_{\text{вр}} \frac{d\varphi_2}{dt} + \xi_2 \varphi_2 &= M_1 \cos \omega t,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

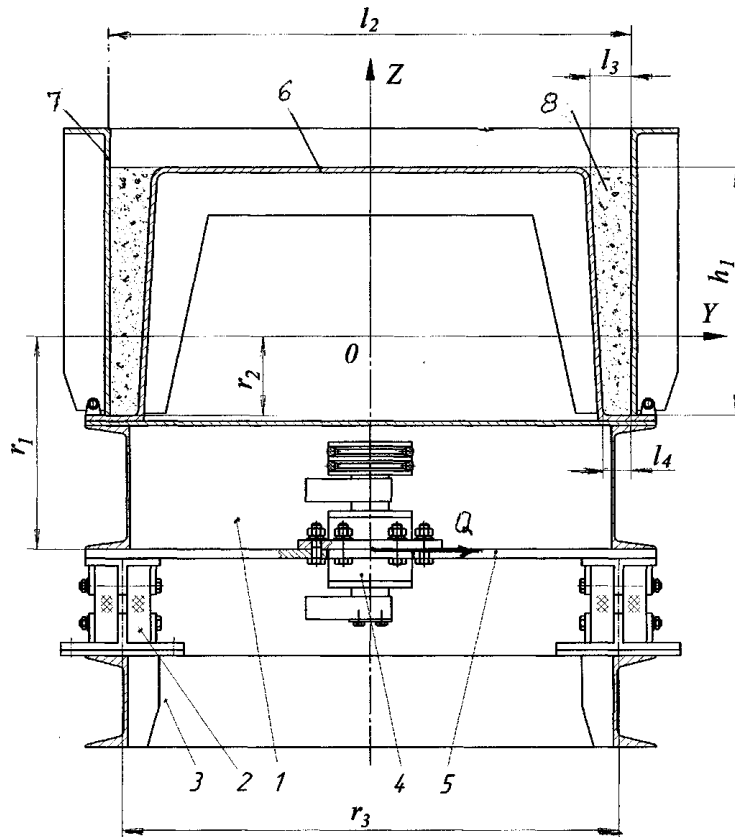


Рисунок 1 – Розрахункова схема віброплощадки на стадії формування бічних стінок бетонного лотка у формі: 1 – рухома рама віброплощадки, 2 – пружна опора, 3 – опорна рама, 4 – віброзбудувач, 5 – опорна плита, 6 – осердя форми, 7 – поздовжній борт, 8 – бетонна суміш.

де  $m$  – маса рухомої рами віброплощадки разом із формою;  
 $x_1, y_1$  – переміщення рухомої рами відповідно по координатних осях  $X$  та  $Y$ ;  
 $c_1, c_2$  – коефіцієнти жорсткості пружних опор відповідно по координатних осях  $X$  і  $Y$ ;  
 $b_1, b_2$  – коефіцієнти непружного опору пружних опор відповідно по координатних осях  $X$  та  $Y$ ;

$Q$  – амплітуда вимушуючої сили;  
 $\omega$  – кутова частота вимушених коливань;  
 $\varphi_1$  – кутовий зсув рухомої системи віброплощини відносно координатної осі  $X$  ;  
 $\xi_1$  – коефіцієнт крутильної жорсткості пружних опор відносно координатної осі  $X$  ,

$$\xi_1 = \frac{c_3 r_3^2}{4} ,$$

де  $c_3$  – коефіцієнт жорсткості пружних опор по осі  $Z$  ;

$r_3$  – відстань між пружними опорами по координатній осі  $Y$  ;

$n_1$  – коефіцієнт непружного опору пружних опор при скручуванні відносно координатної осі  $X$  ,

$$n_1 = \frac{b_3 r_3^2}{4} ,$$

де  $b_3$  – коефіцієнт непружного опору пружних опор по координатній осі  $Z$  ;

$M_1$  – амплітуда моменту вимушуючої сили,

$$M_1 = Qr ;$$

$\varphi_2$  – кутовий зсув рухомої системи віброплощини відносно координатної осі  $Y$  ;

$\xi_2$  – коефіцієнт крутильної жорсткості пружних опор по координатній осі  $Y$  ,

$$\xi_2 = \frac{c_3 r_4^2}{4} ,$$

де  $r_4$  – відстань між пружними опорами у напрямку осі  $X$  ;

$n_2$  – коефіцієнт непружного опору пружних опор при скручуванні відносно координатної осі  $Y$  ,

$$n_2 = \frac{b_3 r_4^2}{4} ;$$

$t$  – час;

$m_\tau$  – приведена маса бетонної суміші, з якої формуються бічні борти лотка, визначається залежністю, виведеною раніше [7, 8],

$$m_\tau = 2h_1 L \eta_s \frac{k_2 (e^{2\alpha_2 l_1} - 1) \cos^2(k_2 l_1) + 2\alpha_2 \sin(k_2 l_1)}{\omega \{ [e^{\alpha_2 l_1} \cos(k_2 l_1) + 1]^2 + \sin^2(k_2 l_1) \}} , \quad (2)$$

де  $l_1$  – середня товщина стінки лотка,

$$l_1 = 0,5(l_3 + l_4) ; \quad (3)$$

$k_2, \alpha_2$  – хвильове число і коефіцієнт загасання збудження в бетонній суміші [7];

$b_\tau$  – коефіцієнт непружного опору суміші при зсувних деформаціях, що створюються поздовжніми стінками форми, визначається на підставі виведених залежностей [7],

$$b_\tau = 2h_1 L \eta_s \frac{2k_2 \sin(k_2 l_1) + \alpha_2 (e^{2\alpha_2 l_1} - 1) \cos^2(k_2 l_1)}{[e^{\alpha_2 l_1} \cos(k_2 l_1) + 1]^2 + \sin^2(k_2 l_1)} ; \quad (4)$$

$m_{i\delta 2}$  – приведена маса бетонної суміші, яка взаємодіє з вертикальними стінками форми при горизонтально направлених коливаннях [7],

$$m_{i\delta 2} = 2h_1L \left( 0,5\xi + Ek_1 \frac{e^{\delta l_1} - \cos(k_1 l_1)}{\sin(k_1 l_1)} \right) \frac{1}{\omega^2}, \quad (5)$$

де  $k_1$ ,  $\xi$ ,  $\delta_1$  – відповідно хвильове число, коефіцієнт опору та коефіцієнт загасання збудження в бетонній суміші [7];

$I_x$  – момент інерції маси бетонної суміші відносно координатної осі  $X$ ,

$$I_x = 2m_{i\delta 1} \left[ \frac{l_1^2}{12} + \frac{(l_2 - l_1)^2}{4} + \frac{h_1^2}{12} + (0,5h_1 - r_2)^2 \right], \quad (6)$$

де  $m_{i\delta 1}$  – приведена маса бетонної суміші при вібраційній дії у вертикальному напрямку, визначається на підставі залежності, виведеної у роботі [7],

$$m_{i\delta 1} = l_1L \left[ \frac{\rho}{k} \operatorname{tg}(k_1 h_1 - \lambda_1) \sqrt{1 - \frac{0,25\xi^2}{E^2\omega^2}} + \frac{0,5\xi}{\omega^2} \right]; \quad (7)$$

$I_y$  – момент інерції маси бетонної суміші відносно поперечної координатної осі  $Y$ ,

$$I_y = m_{i\delta 1} \left[ \frac{L^2}{12} + \frac{h_1^2}{12} + (0,5h_1 - r_2)^2 \right] + m_\tau \frac{L^2}{12}; \quad (8)$$

$n_{y\tau}$  – коефіцієнт непружного опору бетонній суміші при кутовому зсуві відносно осі  $Y$ , визначуваний на підставі виразу (4),

$$n_{y\tau} = b_\tau \frac{L^2}{4}. \quad (9)$$

Розв'язок системи рівнянь коливань (1) для стаціонарних вимушених коливань динамічної системи можна подати в такому вигляді:

$$x_1(t) = A_1 \cos(\omega t + \theta_1); \quad (10)$$

$$y_1(t) = A_2 \sin(\omega t - \theta_2); \quad (11)$$

$$\varphi_1(t) = \Phi_1 \cos(\omega t + \theta_3); \quad (12)$$

$$\varphi_2(t) = \Phi_2 \sin(\omega t - \theta_4), \quad (13)$$

де  $A_1$ ,  $A_2$  – амплітуди гармонійних коливань рухомої рами відповідно по координатних осях  $X$  та  $Y$ :

$$A_1 = \frac{Q}{\sqrt{[c_1 - (m + m_\tau)\omega^2]^2 + (b_1 + b_\tau)^2\omega^2}}; \quad (14)$$

$$A_2 = \frac{Q}{\sqrt{[c_2 - (m + m_{i\delta 2})\omega^2]^2 + b_2^2\omega^2}}; \quad (15)$$

$\theta_1$ ,  $\theta_2$  – кути зсуву фаз між амплітудою вимушуючої сили й амплітудою вимушених коливань рухомої рами відповідно у напрямках координатних осей  $X$  та  $Y$ :

$$\theta_1 = \operatorname{arctg} \frac{(b_1 + b_\tau)\omega}{c_1 - (m + m_\tau)\omega^2}; \quad (16)$$

$$\theta_2 = \operatorname{arctg} \frac{b_2\omega}{c_1 - (m + m_{i\delta 2})\omega^2}; \quad (17)$$

$\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  – амплітуди крутильних гармонійних коливань відносно координатних осей  $X$  і  $Y$ :

$$\Phi_1 = \frac{M_1}{\sqrt{[\xi_1 - (I_1 + I_x)\omega^2]^2 + n_1^2\omega^2}}; \quad (18)$$

$$\Phi_2 = \frac{M_1}{\sqrt{[\xi_2 - (I_2 + I_y)\omega^2]^2 + (n_2 + n_{yT})^2\omega^2}}; \quad (19)$$

$\theta_3, \theta_4$  – кути зсуву фаз між амплітудами моменту вимушеної сили й амплітудами крутильних гармонійних коливань відносно координатних осей  $X$  та  $Y$  :

$$\theta_3 = \arctg \frac{n_1\omega}{\xi_1 - (I_1 + I_x)\omega^2}; \quad (20)$$

$$\theta_4 = \arctg \frac{(n_2 + n_{yT})\omega}{\xi_2 - (I_2 + I_y)\omega^2}. \quad (21)$$

Закони руху бічної поверхні форми, що контактує з ущільнюваною бетонною сумішшю, можна описати такою системою рівнянь:

$$u_x(z, t) = x_1(t) - z\varphi_1(t) = A_1 \cos(\omega t + \theta_1) - \Phi_1 z \cos(\omega t + \theta_3) \\ \text{при } -r_2 \leq z \leq h_1 - r_2; \quad (22)$$

$$u_y(z, t) = y_1(t) - z\varphi_2(t) = A_2 \sin(\omega t - \theta_2) - \Phi_2 z \sin(\omega t - \theta_4) \\ \text{при } -r_2 \leq z \leq h_1 - r_2; \quad (23)$$

$$u_z(x, t) = 0,5(l_2 - l_1)\varphi_2(t) + x\varphi_1(t) = \\ = 0,5\Phi_2(l_2 - l_1)\sin(\omega t - \theta_4) + \Phi_1 x \cos(\omega t + \theta_3) \\ \text{при } -0,5L \leq x \leq 0,5L, \quad (24)$$

де  $u_x(z, t)$ ,  $u_y(z, t)$ ,  $u_z(x, t)$  – закони руху бічної поверхні форми, що контактує з ущільнюваною бетонною сумішшю відповідно у напрямку осей  $X$ ,  $Y$  та  $Z$ .

Після перетворень виразів (22) – (24) отримаємо залежності  $u_x(z, t)$ ,  $u_y(z, t)$ ,  $u_z(x, t)$ , зручні для подальшого аналізу і моделювання на ПЕОМ:

$$u_x(z, t) = A_{1x}(z) \cos[\omega t + \theta_{1x}(z)] \quad \text{при } -r_2 \leq z \leq h_1 - r_2; \quad (25)$$

$$u_y(z, t) = A_{2y}(z) \sin[\omega t - \theta_{2y}(z)] \quad \text{при } -r_2 \leq z \leq h_1 - r_2; \quad (26)$$

$$u_z(x, t) = A_{3z}(x) \sin[\omega t - \theta_{3z}(x)] \quad \text{при } -0,5L \leq x \leq 0,5L, \quad (27)$$

Де  $A_{1x}(z)$ ,  $A_{2y}(z)$  і  $A_{3z}(x)$  – змінні амплітуди гармонійних коливань рухливої рами відповідно у напрямках координатних осей  $X$ ,  $Y$  та  $Z$  :

$$A_{1x}(z) = \sqrt{A_1^2 + \Phi_1^2 z^2 - 2A_1\Phi_1 z \cos(\theta_1 - \theta_3)}; \quad (28)$$

$$A_{2y}(z) = \sqrt{A_2^2 + \Phi_2^2 z^2 - 2A_2\Phi_2 z \cos(\theta_2 - \theta_4)}; \quad (29)$$

$$A_{3z}(x) = \sqrt{0,25\Phi_2^2(l_2 - l_1)^2 + \Phi_1^2 x^2 - \Phi_1\Phi_2(l_2 - l_1)x \sin(\theta_3 + \theta_4)}; \quad (30)$$

$\theta_{1x}(z)$ ,  $\theta_{2y}(z)$ ,  $\theta_{3z}(z)$  – змінні кути зсуву фаз між амплітудою вимушеної сили і змінними амплітудами вимушених коливань рухомої рами відповідно у напрямках координатних осей  $X$ ,  $Y$  та  $Z$ :

$$\theta_{1x}(z) = \operatorname{arctg} \frac{A_1 \sin \theta_1 - \Phi_1 z \sin \theta_3}{A_1 \cos \theta_1 - \Phi_1 z \cos \theta_3}; \quad (31)$$

$$\theta_{2y}(z) = \operatorname{arctg} \frac{A_2 \sin \theta_2 - \Phi_2 z \sin \theta_4}{A_2 \cos \theta_2 - \Phi_2 z \cos \theta_4}; \quad (32)$$

$$\theta_{3z}(x) = \operatorname{arctg} \frac{0,5\Phi_2(l_2 - l_1)\sin \theta_4 - \Phi_1 x \cos \theta_3}{0,5\Phi_2(l_2 - l_1)\cos \theta_4 - \Phi_1 x \sin \theta_3}. \quad (33)$$

Вирази (25), (26) і (27) описують закон руху форми, встановленої на рухомій рамі віброплощадки, яка взаємодіє з ущільнюваним середовищем та впливає на бетонну суміш, у вигляді просторової змінної по величині амплітудно-частотної вібраційної дії.

#### **Висновки:**

1. Досліджено динамічну систему «віброплощадка – бетонне середовище», на яку діє збудження у вигляді горизонтально направленої вимушеної сили, прикладеної нижче від центра мас коливальної системи, на стадії роботи віброплощадки при заповненні бетонною сумішшю простору між поздовжніми бортами й осердям форми без урахування верхнього шару бетонної суміші в припущенні, що рухома рама віброплощадки, борти та осердя форми є абсолютно жорсткими тілами, а пружні опори ізолюють нижню раму і фундамент від шкідливої вібраційної дії.

2. Після подальших досліджень робочого режиму віброплощадки на завершальному етапі формування виробу буде можливим визначення закону руху й раціональних параметрів вібраційної машини, які забезпечать стійкий режим роботи і необхідну ефективність формування бетонного лотка.

#### *Література*

Назаренко, І.І. *Машини для виробництва будівельних матеріалів: підручник* / І.І. Назаренко. – К.: КНУБА. – 1999. – 544 с.

1. Нестеренко, М.П. *Аналіз конструктивно-технологічних параметрів віброплощадок і віброустановок для формування залізобетонних виробів* / М.П. Нестеренко // *Техніка будівництва*. – К.: Академія будівництва. – Київський національний університет будівництва та архітектури. – 2010. – № 24. – С. 18 – 23.

2. Нестеренко, М.П. *Вібраційні площадки з просторовими коливаннями для підприємств будівельної індустрії* / М.П. Нестеренко // *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. – Полтава: ПолтНТУ. – 2002. – Вип. 9. – С. 90 – 93.

3. Маслов, А.Г. *Вибрационные машины и процессы в дорожном строительстве* / А.Г. Маслов, В.М. Пономарь. – К.: Будівельник. – 1985. – 128 с.

4. Нестеренко, М.П. *Аналітичне моделювання вібраційної установки з урахуванням впливу бетонної суміші на динаміку віброущільнення* / М.П. Нестеренко, П.О. Молчанов // *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. – Полтава: ПолтНТУ. – 2011 – Вип. 1 (29). – С. 3 – 10.

5. Нестеренко, М.П. *Математичне моделювання вібраційних машин для формування залізобетонних виробів з урахуванням впливу бетонної суміші на робочий орган* / М.П. Нестеренко, Д.С. Педь // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*. – Кременчук: КДТУ. – 2009. – № 1 (54), Ч. 1. – С. 78 – 80.

6. Нестеренко, М.П. *Дослідження характеру взаємодії вертикальних стінок форми з бетонною сумішшю при дії горизонтальної складової просторових коливань*

віброплощадки / М.П. Нестеренко // Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління. – Кременчук: КУЕІТУ. – 2009. – № 4 (26). – С 153 – 158.

7. Нестеренко, М.П. Дослідження характеру взаємодії віброплощадки з бетонною сумішшю при дії вертикально направленої складової просторових коливань віброплощадки / М.П. Нестеренко // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ. – 2009. – Вип. 3 (25), Т. 1. – С. 136 – 142.

Надійшла до редакції 01.12. 2011

© М.П. Нестеренко

**Н.П. Нестеренко, к. т. н., доцент**

*Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО РЕЖИМА ВИБРОПЛОЩАДКИ НА СТАДИИ ФОРМОВАНИЯ БОКОВЫХ СТЕНОК БЕТОННОГО ЛОТКА**

*Проведены аналитические исследования рабочего режима виброплощадки на этапе формирования боковых стенок бетонного лотка без учета верхнего слоя бетонной смеси.*

**Ключевые слова:** бетонная смесь, виброплощадка, вибровозбудитель, дебаланс, пространственные колебания, упругая опора.

**M.P. Nesterenko, Ph. D.**

*Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk*

## **RESEARCH OPERATING CONDITION WORK OF VIBRATION PLATFORM ON THE STAGE SHAPING LATERAL WALLS OF CONCRETE TRAY**

*Analytical researches operating condition work vibration platform are conducted on the stage shaping lateral walls of concrete tray without the account overhead layer of concrete mixture.*

**Keywords:** concrete mixture, vibration platform, vibration exciter, unbalance, spatial vibrations, resilient support.