

УДК 693

М.М. Ручинський, к.т.н., доцент;  
Д.Я. Свиридюк, аспірант

## ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛИВАНЬ ВІБРАЦІЙНОГО БЕТОНОЗМІШУВАЧА З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ПЕРЕМІШУВАНОВОГО МАТЕРІАЛУ

**АНОТАЦІЯ.** Вирішено задачу спільної оцінки параметрів робочого процесу перемішування з урахуванням сил опору бетонної суміші в гравітаційному бетонозмішувачі.

**Ключові слова:** гравітаційний бетонозмішувач, перемішування, коливання, вібрація, аналіз.

**SUMMARY.** The problem of joint estimation of the parameters of the working process of mixing with the force of resistance of the concrete mix in the gravity mixer.

**Key words:** gravity concrete mixer, mixing, oscillations, vibration analysis.

**Постановка проблеми.** На характер коливань вібраційного бетонозмішувача при вертикальному розташуванні барабану змішувача і ефективність вібраційного перемішування і обробки бетонних сумішей великий вплив здійснюють фізико-механічні властивості і динамічні характеристики перемішуваної суміші. Порівняно точне врахування сил опору бетонній суміші у вигляді інерційних і дисипативних сил багато в чому визначає точність встановлення закону коливань барабану змішувача, обґрунтування його раціональних параметрів і параметрів вібромеханічної дії на оброблюване середовище. Ці сили опору виникають при взаємодії стінок барабану змішувача з бетонною сумішшю в горизонтальному і вертикальному напрямі, при вертикальних коливаннях днища барабану змішувача, при крутильних коливаннях елементів барабану змішувача і мають при цьому різні характеристики і значення.

**Метою даної роботи** є вирішення задачі спільної оцінки параметрів робочого процесу перемішування з урахуванням сил опору бетонної суміші.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** При коливаннях у вертикальному напрямі на днищі барабану змішувача з боку оброблюваної бетонної суміші діятимуть сили опору, які можна представити у вигляді інерційних сил і дисипативних сил, тобто сил непружного опору. Ці сили можна описати наступними залежностями:

$$F_{in1} = m_{pr1} \frac{d^2 z}{dt^2}; \quad (1)$$

$$F_{ds1} = b_{pr1} \frac{dz}{dt}, \quad (2)$$

де  $m_{pr1}$  – приведена маса бетонної суміші, що взаємодіє з днищем барабану змішувача при вертикально направлених коливаннях;

$b_{pr1}$  – приведений коефіцієнт непружного опору бетонній суміші.

При цьому величина приведеної маси бетонної суміші може бути визначена за [1]:

$$m_{pr1} = \frac{\rho F_1}{k_1} \operatorname{tg} k_1 H_r, \quad (3)$$

де  $\rho$  – динамічна щільність бетонної суміші;

$F_1$  – площа днища барабану змішувача, що контактує з бетонною сумішшю;



$k_1$  – хвильове число

$$k_1 = \frac{\omega}{a_1}; \quad (4)$$

$a_1$  – фазова швидкість поширення обурення в оброблюваному шарі

$$a_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}; \quad (5)$$

$E$  – динамічний модуль пружної деформації оброблюваної бетонної суміші;

$H_r$  – розрахункова товщина оброблюваного шару, вибрана з умови:

$$\text{при } h \leq \frac{\pi}{4\omega} \sqrt{\frac{E}{\rho}}; \quad H_r = h \quad (6)$$

$$\text{при } h > \frac{\pi}{4\omega} \sqrt{\frac{E}{\rho}}; \quad H_r = \frac{\pi}{4\omega} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (7)$$

$h$  – товщина оброблюваного шару.

Коефіцієнт непружного опору бетонній суміші визначимо з наступної залежності:

$$b_{pr1} = \eta_1 k_1 F_1 \operatorname{tg} k_1 H_r, \quad (8)$$

де  $\eta_1$  – коефіцієнт динамічної в'язкості бетонної суміші

$$\eta_1 = f_{v1} H_r \sqrt{E\rho}; \quad (9)$$

$f_{v1}$  – коефіцієнт внутрішнього тертя бетонної суміші.

З приведених залежностей (3) і (8) знайдемо питомі значення приведеної маси і коефіцієнта непружного опору:

$$m_{ypr1} = \frac{\rho}{k_1} \operatorname{tg} k_1 H_r, \quad (10)$$

$$b_{ypr1} = \eta_1 k_1 \operatorname{tg} k_1 H_r. \quad (11)$$

Питомі значення приведеної маси і коефіцієнта непружного опору бетонній суміші, що взаємодіє з циліндровими стінками барабану змішувача при горизонтально направлених коливаннях визначимо з наступних залежностей:

$$m_{ypr2} = \frac{m_{ypr1}}{2(1+\mu)} = \frac{\rho}{2k_1(1+\mu)} \operatorname{tg} k_1 L_r; \quad (12)$$

$$b_{ypr2} = \frac{b_{ypr1}}{2(1+\mu)} = \frac{\eta_1 k_1}{2(1+\mu)} \operatorname{tg} k_1 L_r, \quad (13)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона;

$L_r$  – довжина оброблюваного шару в горизонтальному напрямі.

Для визначення характеру руху барабану змішувача у вібраційному робочому режимі розглянемо розрахункову схему динамічної системи барабан «змішувача – оброблюване середовище» (рис.1 а,б).

Для визначення значення приведеної маси і коефіцієнта непружного опору бетонній суміші, що взаємодіє з циліндровими стінками барабану змішувача при горизонтально направлених коливаннях у напрямі координати умовно розіб'ємо всю перемішувану бетонну суміш, що знаходиться в циліндровій частині барабану змішувача, на ряд елементарних вертикальних об'ємів однакової ширини (Рис. 1,б). З рис. (рис.1 а,б) слідує:

$$\Delta_l = \frac{2R}{n}. \quad (14)$$

Довжина кожного  $i$ -го об'єму шириною  $\Delta l$ , що знаходиться на відстані від обичайки барабану визначимо з наступної залежності:

$$L_i = \sqrt{R^2 + (R - i\Delta l)^2} . \tag{15}$$

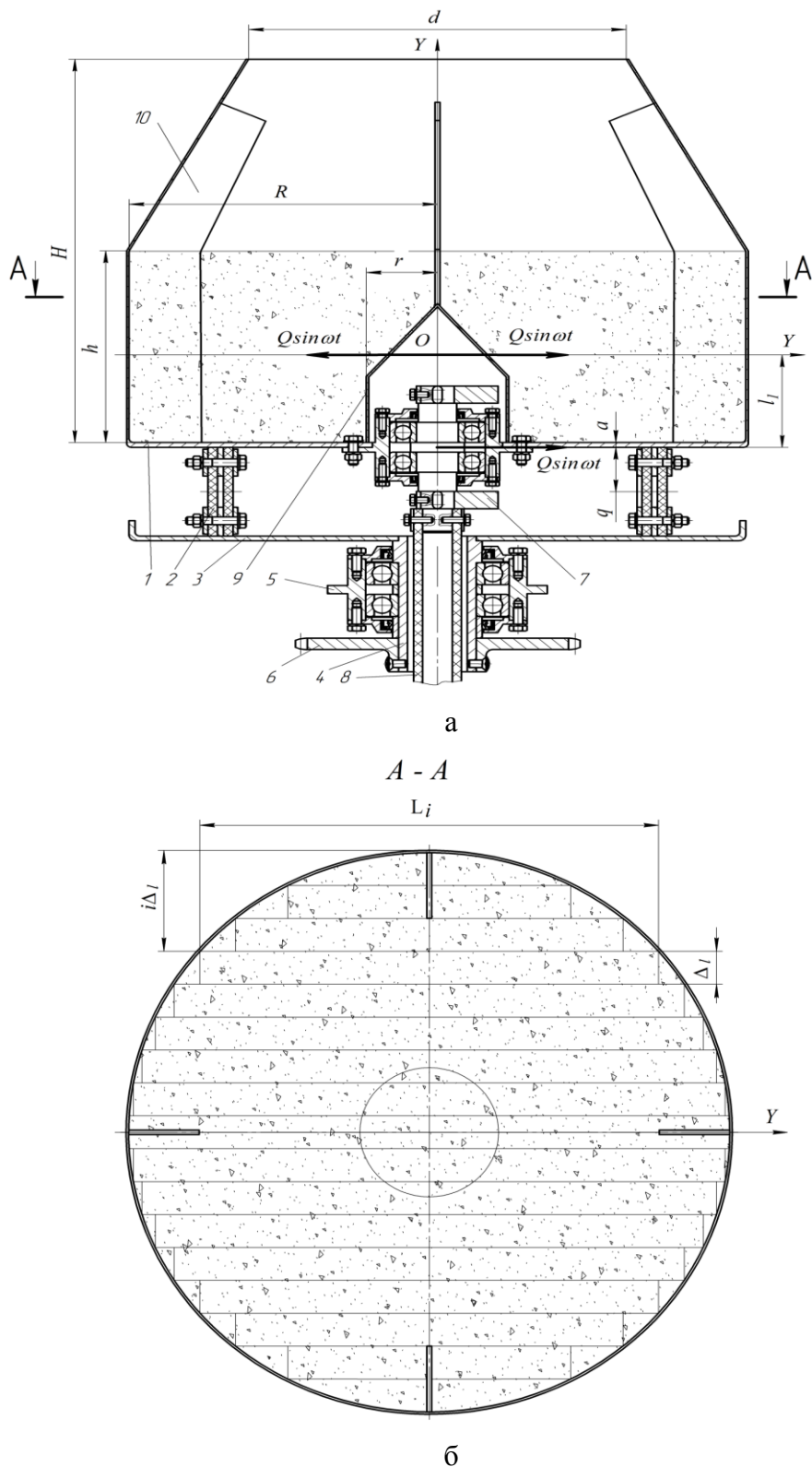


Рисунок 1. Динамічна система барабан «змішувач – оброблюване середовище»:  
 а – схема розрахунків; б – розріз.



На підставі отриманих виразів (12), (13) і (15) визначимо значення приведеної маси і коефіцієнта непружного опору бетонній суміші для кожного елементарного об'єму, що взаємодіє з циліндровими стінками барабану змішувача при горизонтально направлених коливаннях:

$$m_{ipr2} = \frac{h\Delta_1\rho}{2k_1(1+\mu)} \operatorname{tg}k_1L_i; \quad (16)$$

$$b_{ipr2} = \frac{h\Delta_1\eta_1k_1}{2(1+\mu)} \operatorname{tg}k_1L_i, \quad (17)$$

Використовуючи залежності (16) і (17) і рис. 1,б, знайдемо значення приведеної маси і коефіцієнта непружного опору бетонній суміші, що взаємодіє з циліндровими стінками барабану змішувача при горизонтально направлених коливаннях в наступному вигляді:

$$m_{pr2} = \sum_{i=1}^n m_{ipr2} = \frac{\rho}{2k_1(1+\mu)} \sum_{i=1}^n h\Delta_1 \operatorname{tg}k_1L_i; \quad (18)$$

$$b_{pr2} = \sum_{i=1}^n b_{ipr2} = \frac{\eta_1}{2(1+\mu)} \sum_{i=1}^n h\Delta_1 k_1 \operatorname{tg}k_1L_i. \quad (19)$$

На підставі отриманих виразів (10), (11), (18), (19) розрахункової схеми, представленої на рис. 1,а і 1,б, і методиці, викладеній вище, коливання барабану змішувача, завантаженого бетонною сумішшю, можна представити у вигляді наступної системи диференціальних рівнянь:

– коливання в горизонтальному напрямі уздовж координатної осі :

$$(m + m_{pr2}) \frac{d^2 y_{1r}}{dt^2} + (b_2 + b_{pr2}) \frac{dy_{1r}}{dt} + c_2 y_{1r} = Q \sin \omega t; \quad (20)$$

– коливання в горизонтальному напрямі уздовж координатної осі :

$$(m + m_{pr2}) \frac{d^2 x_{1r}}{dt^2} + (b_3 + b_{pr2}) \frac{dx_{1r}}{dt} + c_3 x_{1r} = Q \cos \omega t; \quad (21)$$

– кутові (крутильні) коливання відносно координатної осі :

$$(J_x + J_{b1}) \frac{d^2 \psi_{xr}}{dt^2} + (n_2 + n_{b2}) \frac{d\psi_{xr}}{dt} + k_2 \psi_{xr} = Q l_1 \sin \omega t; \quad (22)$$

– кутові (крутильні) коливання відносно координатної осі :

$$(J_y + J_{b1}) \frac{d^2 \psi_{yr}}{dt^2} + (n_3 + n_{b2}) \frac{d\psi_{yr}}{dt} + k_3 \psi_{yr} = Q l_1 \cos \omega t; \quad (23)$$

– коливання по вертикалі у напрямі координатної осі по осі :

$$z_{xr} = x \psi_{yr}; \quad (24)$$

– коливання по вертикалі у напрямі координатної осі по осі :

$$z_{yr} = y \psi_{xr}, \quad (25)$$

де  $x, y$  – лінійні переміщення барабану змішувача у напрямі координатних осей, і під дією гармонійних збуджуючих сил і в робочому режимі;

$\psi_{xr}, \psi_{yr}$  – кутові переміщення барабану змішувача відносно координатних осей, відповідно під дією моментів збуджуючих сил і в робочому режимі;

$l_1$  – відстань від центру додатка збуджуючої сили віброзбудника коливань до центру тяжіння динамічної системи, що коливається, в робочому режимі у напрямі координати

$$l_1 = \frac{ml + m_{pr1}(0,5h + a)}{m + m_{pr1}}; \quad (26)$$

$J_{b1}$  – момент інерції бетонної суміші відносно горизонтальної осі тяжіння, що проходить через цент:

$$J_{b1} = \frac{1}{2} m_{pr2} R^2 + \frac{1}{12} m_{pr2} h^2 + m_{pr2} (0,5h + a - l_1)^2; \quad (27)$$

$n_{b2}$  – коефіцієнт непружного опору бетонній суміші при кутових переміщеннях системи, що коливається, відносно горизонтальної осі;

$$n_{b2} = 0,5hb_{pr2}. \quad (28)$$

Вирішення системи диференціальних рівнянь (20 - 23) для стаціонарних коливань, що описують сталий рух вертикально встановленого барабану змішувача в робочому режимі, представимо в наступному вигляді:

$$y_{1r}(t) = A_{1r} \sin(\omega t - \varphi_{1r}); \quad (29)$$

$$x_{1r}(t) = A_{2r} \cos(\omega t + \varphi_{2r}); \quad (30)$$

$$\psi_{xr}(t) = \Psi_{1r} \sin(\omega t - \xi_{1r}); \quad (31)$$

$$\psi_{yr}(t) = \Psi_{2r} \cos(\omega t + \xi_{2r}), \quad (32)$$

де  $A_{1r}$  – амплітуда гармонійних коливань центру тяжіння системи, що коливається, у напрямі координати в робочому режимі;

$A_{2r}$  – амплітуда гармонійних коливань центру тяжіння системи, що коливається, у напрямі координати в робочому режимі;

$\Psi_{1r}$  – амплітуда кутових (крутильних) гармонійних коливань барабану змішувача відносно осі, що проходить через центр тяжіння системи, що коливається, в робочому режимі;

$\Psi_{2r}$  – амплітуда кутових (крутильних) гармонійних коливань барабану змішувача відносно осі, що проходить через центр тяжіння системи, що коливається, в робочому режимі;

$\varphi_{1r}, \varphi_{2r}$  – кут зрушення фаз між амплітудами збуджуючих сил і амплітудами вимушених коливань;

$\xi_{1r}, \xi_{2r}$  – кут зрушення фаз між амплітудами моментів збуджуючих сил і амплітудами кутових вимушених коливань;

$$A_{1r} = \frac{Q}{\sqrt{[c_2 - (m + m_{pr2})]^2 + (b_2 + b_{pr2})^2 \omega^2}}; \quad (33)$$

$$A_{2r} = \frac{Q}{\sqrt{[c_3 - (m + m_{pr2})]^2 + (b_2 + b_{pr2})^2 \omega^2}}; \quad (34)$$

$$\Psi_{1r} = \frac{Ql_1}{\sqrt{[k_2 - (J_x + J_{b1})]^2 + (n_2 + b_{b2})^2 \omega^2}}; \quad (35)$$

$$\Psi_{2r} = \frac{Ql_1}{\sqrt{[k_3 - (J_x + J_{b1})]^2 + (n_3 + b_{b2})^2 \omega^2}}; \quad (36)$$

$$\varphi_{1r} = \arctg \frac{(b_2 + b_{pr2})\omega}{c_2 - (m + m_{pr2})}; \quad (37)$$

$$\varphi_{2r} = \arctg \frac{(b_3 + b_{pr2})\omega}{c_3 - (m + m_{pr2})}; \quad (38)$$

$$\xi_{1r} = \arctg \frac{(n_2 + b_{b2})\omega}{k_2 - (J_x + J_{b1})}; \quad (39)$$



$$\xi_{2r} = \arctg \frac{(n_3 + b_{b2})\omega}{k_3 - (J_x + J_{b1})}. \quad (40)$$

Використовуючи отримані вирішення (29 - 40) системи рівнянь (20 - 25) даної динамічної системи, послідовно визначимо закони руху днища і стінок барабану змішувача, а також захисного ковпака, що впливають на оброблювану бетонну суміш, як у вертикальному, так і в горизонтальному напрямках, і що викликають в оброблюваному середовищі нормальні і дотичні напруження, яка істотно впливає на руйнування внутрішніх зв'язків в бетонній суміші і, відповідно, на ефективність вібраційної обробки і перемішування бетонної суміші, що готується.

Закон руху днища барабану змішувача, що взаємодіє з оброблюваною бетонною сумішшю по горизонталі у напрямі координати, можна описати наступним рівнянням:

$$\begin{aligned} X_{dr}(t) &= x_{1r}(t) + (l - a)\psi_{yr}(t) = \\ &= A_{2r} \cos(\omega t + \varphi_{2r}) + \Psi_{2r}(l - a) \cos(\omega t + \xi_{2r}), \end{aligned} \quad (41)$$

де  $A_{2r}$  – переміщення днища барабану змішувача по горизонталі у напрямі координати, що викликає в бетонному середовищі дотичні напруження.

Після перетворень виразу (41) отримаємо залежність, зручну для аналізу і моделювання на ЕОМ:

$$X_{dr}(t) = A_{2d} \cos(\omega t + \theta_2), \quad (42)$$

де  $A_{2d}$  – амплітуда гармонійних коливань днища барабану змішувача у напрямі координатної осі

$$A_{2d} = \sqrt{A_{2r}^2 + [\Psi_{2r}(l - a)]^2 + 2A_{2r}\Psi_{2r}(l - a)\cos(\varphi_{2r} - \xi_{2r})}; \quad (43)$$

$\theta_2$  – кут зрушення фаз між амплітудою збуджуючої сили і амплітудою вимушених коливань днища барабану змішувача у напрямі координатної осі

$$\theta_1 = \arctg \frac{A_{2r} \sin \varphi_{2r} + \Psi_{2r}(l - a) \sin \xi_{2r}}{A_{2r} \cos \varphi_{2r} + \Psi_{2r}(l - a) \cos \xi_{2r}}. \quad (44)$$

Закон руху днища барабану змішувача, що взаємодіє з оброблюваною бетонною сумішшю по горизонталі у напрямі координати, можна описати наступним рівнянням:

$$\begin{aligned} Y_{dr}(t) &= y_{1r}(t) + (l - a)\psi_{xr}(t) = \\ &= A_{1r} \sin(\omega t - \varphi_{1r}) + \Psi_{1r}(l - a) \sin(\omega t - \xi_{1r}), \end{aligned} \quad (45)$$

де  $y_{1r}(t)$  – переміщення днища барабану змішувача по горизонталі у напрямі координати, яке також викликає в бетонному середовищі дотичні напруження.

Перетворюючи вираз (45), отримаємо залежність, зручну для аналізу і моделювання на ЕОМ:

$$Y_{dr}(t) = A_{1d} \sin(\omega t - \theta_1), \quad (46)$$

де  $A_{1d}$  – амплітуда гармонійних коливань днища барабану змішувача у напрямі координатної осі

$$A_{1d} = \sqrt{A_{1r}^2 + [\Psi_{1r}(l - a)]^2 + 2A_{1r}\Psi_{1r}(l - a)\cos(\varphi_{1r} - \xi_{1r})}; \quad (47)$$

$\theta_1$  – кут зрушення фаз між амплітудою збуджуючої сили і амплітудою вимушених коливань днища барабану змішувача у напрямі координатної осі

$$\theta_1 = \arctg \frac{A_{1r} \sin \varphi_{1r} + \Psi_{1r}(l - a) \sin \xi_{1r}}{A_{1r} \cos \varphi_{1r} + \Psi_{1r}(l - a) \cos \xi_{1r}}. \quad (48)$$

Закон руху днища барабану змішувача, що взаємодіє з оброблюваною бетонною сумішшю у вертикальному напрямі уздовж координати, можна описати наступним рівнянням:

$$Z_{dr}(y, t) = y\psi_{xr}(t) = \Psi_{1r}y \sin(\omega t - \xi_{1r}) \text{ при } -R \leq y \leq -(R - r)$$

$$i \text{ при } (R-r) \leq y \leq R . \quad (49)$$

Закон руху днища барабану змішувача, що взаємодіє з оброблюваною бетонною сумішшю у вертикальному напрямі уздовж координати, можна описати наступним рівнянням:

$$Z_{dr}(x,t) = x\psi_{yr}(t) = x\Psi_{2r} \cos(\omega t + \xi_{2r}) \text{ при } -R \leq x \leq -(R-r)$$

$$i \text{ при } (R-r) \leq x \leq R . \quad (50)$$

Тут  $Z_{dr}(y,t)$  і  $Z_{dr}(x,t)$  – переміщення днища барабану змішувача у вертикальному напрямі уздовж координат  $x$  і  $y$ , що викликає в бетонному середовищі нормальні напруження.

Закон руху обичайки барабану змішувача, що взаємодіє з оброблюваною бетонною сумішшю по горизонталі у напрямі координати, можна описати наступним рівнянням:

$$X_{obr}(z,t) = x_{1r}(t) + z\psi_{yr}(t) = A_{2r} \cos(\omega t + \varphi_{2r}) + \Psi_{2r}z \cos(\omega t + \xi_{2r})$$

$$\text{при } -(l-a) \leq Z \leq (H-l+a) . \quad (51)$$

де  $X_{obr}(z,t)$  – переміщення обичайки барабану змішувача в горизонтальному напрямі уздовж координати, що викликає в оброблюваному середовищі нормальні напруження;

Після перетворень вираження (2.87) отримаємо залежність, зручну для аналізу і моделювання на ЕОМ:

$$X_{obr}(z,t) = A_{3ob}(z) \cos[\omega t + \theta_3(z)] , \quad (52)$$

де  $A_{3ob}(z)$  – змінна амплітуда гармонійних коливань обичайки барабану змішувача у напрямі координатної осі

$$A_{3ob} = \sqrt{A_{2r}^2 + (\Psi_{2r}z)^2 + 2A_{2r}\Psi_{2r}z \cos(\varphi_{2r} - \xi_{2r})} ; \quad (54)$$

$\theta_3(z)$  – змінний кут зрушення фаз між амплітудою збуджуючої сили і амплітудою вимушених коливань обичайки барабану змішувача у напрямі координатної осі

$$\theta_3(z) = \arctg \frac{A_{2r} \sin \varphi_{2r} + \Psi_{2r}z \sin \xi_{2r}}{A_{2r} \cos \varphi_{2r} + \Psi_{2r}z \cos \xi_{2r}} . \quad (55)$$

Закон руху обичайки барабану змішувача, що взаємодіє з оброблюваною бетонною сумішшю по горизонталі у напрямі координати, можна описати наступним рівнянням:

$$Y_{obr}(z,t) = y_{1r}(t) + z\psi_{xr}(t) = A_{1r} \sin(\omega t - \varphi_{1r}) + \Psi_{1r}z \sin(\omega t - \xi_{1r})$$

$$\text{при } -(l-a) \leq Z \leq (H-l+a) . \quad (56)$$

де  $Y_{obr}(z,t)$  – переміщення обичайки барабану змішувача в горизонтальному напрямі уздовж координати, що викликає в оброблюваному середовищі нормальні напруження.

Перетворюючи вираження (55) отримаємо залежність, зручну для аналізу і моделювання на ЕОМ:

$$Y_{obr}(z,t) = A_{4ob}(z) \sin[\omega t - \theta_4(z)] , \quad (57)$$

де  $A_{4ob}(z)$  – змінна амплітуда гармонійних коливань обичайки барабану змішувача у напрямі координатної осі

$$A_{4ob} = \sqrt{A_{1r}^2 + (\Psi_{1r}z)^2 + 2A_{1r}\Psi_{1r}z \cos(\varphi_{1r} - \xi_{1r})} ; \quad (58)$$

$\theta_4(z)$  – змінний кут зрушення фаз між амплітудою збуджуючої сили і амплітудою вимушених коливань обичайки барабану змішувача у напрямі координатної осі

$$\theta_4(z) = \arctg \frac{A_{1r} \sin \varphi_{1r} + \Psi_{1r}z \sin \xi_{1r}}{A_{1r} \cos \varphi_{1r} + \Psi_{1r}z \cos \xi_{1r}} . \quad (59)$$

Закон руху обичайки барабану змішувача, що взаємодіє з оброблюваною бетонною сумішшю у вертикальному напрямі уздовж координат  $y$  і  $x$ , можна описати наступними рівняннями:



- для циліндричної частини

$$Z_{obyр}(t) = R\psi_{xr}(t) = \Psi_{1r} R \sin(\omega t - \xi_{1r}); \quad (60)$$

$$Z_{obxr}(t) = R\psi_{yr}(t) = \Psi_{2r} R \cos(\omega t + \xi_{2r}); \quad (61)$$

- для конусної частини

$$Z_{obyр}(y, t) = R\psi_{xr}(t) = \Psi_{1r} \left[ R - \frac{y - (h - l + a)}{tg\beta} \right] \sin(\omega t - \xi_{1r})$$

при  $(h - l + a) \leq y \leq (H - l + a)$ ; (62)

$$Z_{obxr}(x, t) = R\psi_{yr}(t) = \Psi_{2r} \left[ R - \frac{y - (h - l + a)}{tg\beta} \right] \cos(\omega t + \xi_{2r})$$

при  $(h - l + a) \leq x \leq (H - l + a)$  (63)

де  $Z_{obyр}(t)$  і  $Z_{obxr}(t)$  – переміщення циліндричної частини барабану змішувача у вертикальному напрямі уздовж координат  $x$  і  $y$ , що викликає в бетонному середовищі нормальні напруження;

$Z_{obyр}(y, t)$  і  $Z_{obxr}(x, t)$  – переміщення конусної частини барабану змішувача у вертикальному напрямі уздовж координат  $x$  і  $y$ .

Аналіз отриманих виразів показує, що барабан змішувача в процесі роботи здійснює складні просторові коливання, покликані забезпечувати ефективну вібраційну дію на перемішувану цементобетонну суміш. Причому кожна точка, що знаходиться на внутрішній поверхні барабану змішувача має свій закон руху. Внаслідок чого перемішувана бетонна суміш випробовуватиме змінну амплітудно-частотну дію, яка викликає в суміші різноспрямовану нормальні і дотичні напруження, що забезпечує в ній граничне руйнування внутрішніх зв'язків і велику рухливість, що сприяє збільшенню масообміну і ефективному перемішуванню.

Таким чином, отримані вирази (29 – 63) дозволяють встановити закон руху всіх поверхонь внутрішньої поверхні змішувача, що взаємодіють з оброблюваною цементобетонною сумішшю в процесі її приготування, визначити основні параметри пропонованого вібраційного пристрою залежно від фізико-механічних характеристик оброблюваної суміші, обґрунтувати раціональні режими вібраційної дії на бетонну суміш в процесі її вібраційної обробки і приготування.

## Висновки

1. Розроблена математична модель вібраційного барабану бетонозмішувача вільного перемішування, яка задовольняє цілям опису цієї складної динамічної системи, що здійснює просторові коливання у вигляді лінійних і кутових коливань у напрямі координатних осей, і, що проходять через центр тяжіння системи, що коливається, обчисленого без врахування маси формованого виробу. Вона враховує конструктивні особливості барабану змішувача, фізико-механічні характеристики динамічної системи, місце закріплення і положення віброзбудника коливань відносно загального центру тяжіння динамічної системи, вигляду і напрямку вібраційної дії.

2. Отримано аналітичні залежності, які описують поведінку динамічної системи і дозволяють встановити закон руху і амплітуди кутових і прямолінійних коливань барабану змішувача бетонозмішувача вільного перемішування залежно від конструктивних і фізико-механічних характеристик системи, напрямку, вигляду і співвідношення збуджуючих навантажень, що викликають кругові і крутильні коливання.

## Література

1. Назаренко І.І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем / І.І. Назаренко // Навчальний посібник (2-е видання). К.: Видавничий дім "Слово", 2010.– 440 с.