

РАЗРАБОТКА ТЕОРИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИБРОПЛОЩАДКИ С БЕТОННОЙ СМЕСЬЮ**Жанар Батсайхан**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: kmt0.43@gmail.com

На основе анализа существующих методов уплотнения бетонных смесей рассмотрена схема вибрационного уплотнения бетонных смесей на виброплощадке с вертикально направленными колебаниями, содержащей подвижную раму, которая установлена на опорной раме при помощи упругих амортизаторов. В нижней части подвижной рамы смонтирован вибровозбудитель направленных колебаний, а на ее поверхности установлена форма с бетонной смесью. Для определения характера взаимодействия виброплощадки с бетонной смесью произведено исследование динамической системы «виброплощадка – бетонная среда», в которой последняя представлена в виде системы с распределенными параметрами, учитывающей упругие, вязкие, инерционные и энергетические свойства формуемой бетонной смеси. Составлено уравнение в частных производных, описывающее изменение напряжений в уплотняемой среде в зависимости динамического модуля упругой деформации, коэффициента динамической вязкости, коэффициента неупругого сопротивления и инерционности уплотняемой среды в функциональной зависимости от плотности, относительной деформации и консистенции бетонной смеси. Составлено волновое уравнение колебаний, описывающее распространение вязко-упруго-пластических волн деформаций в уплотняемой бетонной при вертикальном вибрационном воздействии. В результате решения волнового уравнения колебаний установлена закономерность распространения вязко-упруго-пластических волн деформаций, а также найден закон колебаний подвижной рамы виброплощадки, взаимодействующей с бетонной смесью.

Ключевые слова: виброплощадка, бетонная смесь, взаимодействие, закон колебаний.

РОЗРОБКА ТЕОРІЇ ВЗАЄМОДІЇ ВІБРОПЛОЩАДКИ З БЕТОННОЮ СУМІШШЮ**Жанар Батсайхан**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: kmt0.43@gmail.com

На основі аналізу існуючих методів ущільнення бетонних сумішей розглянуто схему вібраційного ущільнення бетонних сумішей на виброплощадки з вертикально направленими коливаннями, що містить рухому раму, яка встановлена на опорній рамі за допомогою пружних амортизаторів. У нижній частині рухомої рами змонтовано вібровозбудувач спрямованих коливань, а на її поверхні встановлена форма з бетонною сумішшю. Для визначення характеру взаємодії вібраційної площадки з бетонною сумішшю проведено дослідження динамічної системи «віброплощадка – бетонне середовище», в якій останнє представлено у вигляді системи з розподіленими параметрами, що враховує пружні, в'язкі, інерційні та енергетичні властивості формуємої бетонної суміші. Складено рівняння в приватних похідних, що описує зміну напруги ущільнюваного середовища залежно від динамічного модуля пружної деформації, коефіцієнта динамічної в'язкості, коефіцієнт непружного опору і інерційності ущільнюваного середовища у функціональній залежності від густини, відносної деформації і консистенції бетонної суміші. Складено хвильове рівняння коливань, що описує поширення в'язко-пружно-пластичних хвиль деформаций в ущільнюваній бетонній суміші між дном форми і вільною поверхнею ущільнюваного середовища. Для вирішення хвильового рівняння коливань використовувалися крайові умови. Перша крайова умова описує взаємодію дна форми з ущільнюваною бетонною сумішшю, а друга крайова умова показує, що бетонна поверхня вільна. Знайдено постійні інтегрування (комплексні функції), що задовольняють крайовим умовам. На підставі рішення хвильового рівняння коливань, що описує поширення хвиль деформаций, визначені: закон поширення в'язко-пружно-пластичних хвиль деформаций в ущільнюваній бетонній суміші, а також наведені значення жорсткості, маси і коефіцієнта непружного опору бетонній суміші, які призначені для використання в континуально-дискретній розрахунковій моделі, що описує взаємодію вібраційної площадки з бетонною сумішшю в формі при різних методах вібраційного впливу, конфігурації ущільнюваного виробу і різних значеннях площі поверхонь взаємодії робочого органу (дна форми) з бетонним середовищем, частоті і амплітуді коливань. Отримані залежності дозволяють обґрунтувати раціональні параметри вібраційної площадки і режими вібраційного впливу на ущільнюване середовище.

Ключові слова: виброплощадка, бетонна суміш, взаємодія, закон коливань.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В современном строительстве для уплотнения бетонных смесей широко применяются виброплощадки с вертикальными, горизонтальными и пространственными колебаниями [1–4]. Для эффективной работы виброплощадок требуется точно определить их основные параметры и режимы вибрационных колебаний в зависимости от физико-механических характеристик уплотняемой среды, которая может быть представлена различными типами реологических моделей

[5–9]. Наиболее точной является реологическая модель [8], которая учитывает действие упругих, диссипативных и инерционных сил, возникающих в уплотняемой среде при вибрационных нагрузках. Поэтому проведение исследований, обеспечивающих точное определение параметров и создание высокопроизводительного и высокотехнологичного вибрационного оборудования простой конструкции для формирования бетонных изделий, является актуальной задачей.

Цель работы – определение теоретическим путем характера взаимодействия виброплощадки с бетонной смесью.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Закономерность колебаний вибрационной площадки, используемой для формирования и обработки бетонных изделий, по существу определяется физико-механическими характеристиками бетонной смеси, направлениями и режимами вибрационного воздействия, толщиной бетонного слоя, подвергающегося вибрационному воздействию и основными параметрами вибрационной машины. В результате взаимодействия вибрационной площадки с бетонной смесью в последней возникают инерционные, упругие и неупругие силы сопротивления, существенно влияющих на процесс уплотнения. Характер возникающих сил сопротивления определяется частотой и амплитудой колебаний, консистенцией и гранулометрическим составом смеси, толщиной уплотняемого слоя, направлением и типом вибрационного воздействия на уплотняемую среду. При достаточно точном определении сил взаимодействия вибрационной площадки с обрабатываемой средой создаются предпосылки для установления рациональных параметров уплотняющей вибрационной машины, обеспечивающих эффективное формирование и обработку бетонных изделий с малой энергоемкостью и высокой производительностью.

Для определения характера взаимодействия вибрационной площадки с бетонной смесью исследуем динамическую систему «Вибрационная площадка – уплотняемая среда» (рис. 1). Здесь вибрационная площадка состоит из подвижной рамы 1, которая на упругих амортизаторах 2 установлена на опорной раме 3. В нижней части подвижной рамы 1 смонтирован вибровозбудитель колебаний 4, а на ее поверхности установлена форма 5 с бетонной смесью 6. При этом уплотняемая среда представлена в виде системы с распределенными параметрами. Под действием вертикально направленной гармонической силы $Q \sin \omega t$ подвижная рама вместе с формой колеблется в вертикальном направлении и осуществляет вибрационное давление на уплотняемую смесь, под действием которого она уплотняется. Здесь Q – амплитуда вертикальной возмущающей силы; ω – угловая частота вынужденных вертикальных колебаний; t – время.

В соответствии с реологической моделью [8], зависимость между напряжением и деформацией в бетонной среде представим в следующем виде:

$$\sigma(z, t) = E \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} + \eta \frac{\partial u(z, t)}{\partial t} - \rho H_1 \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial t^2} + \mu u(z, t), \quad (1)$$

где $\sigma_n(z, t)$ – напряжения, возникающие в уплотняемом слое; u и z – эйлерова и лагранжева координаты; E – динамический модуль упругой деформации бетонного слоя смеси; η – коэффициент динамической вязкости, учитывающий внутреннее

трение в бетонной смеси; ρ – плотность бетонной смеси; H_1 – приведенная эффективная высота слоя бетонной смеси; μ – коэффициент сопротивления, учитывающий затраты энергии на разрушение внутренних связей, вытеснение воздуха, переориентацию частиц и другие явления в уплотняемой среде, сопровождающие вибрационное уплотнение [8].

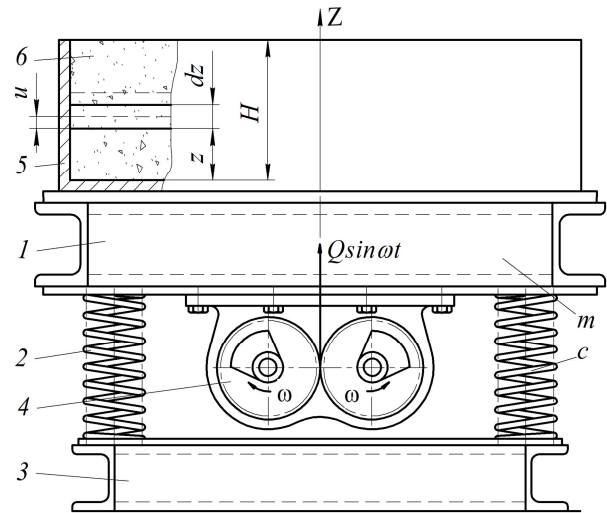


Рисунок 1 – Расчетная схема взаимодействия виброплощадки с бетонной смесью

Колебания слоя бетонной смеси в направлении координаты Z за время t представим зависимостью [10]:

$$\frac{\partial \sigma(z, t)}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial t^2}. \quad (2)$$

Подставляя выражение (1) в зависимость (2), получим уравнение колебаний уплотняемой среды, т.е.

$$E \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial z \partial t} - \rho H_1 \frac{\partial^3 u(z, t)}{\partial z \partial t^2} + \mu u(z, t) = \rho \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial t^2}. \quad (3)$$

Решение уравнения (3) представим в виде мнимой части комплексной функции [11]:

$$u(z, t) = U(z) e^{i\omega t}, \quad (4)$$

где $U(z)$ – комплексная амплитуда колебаний, удовлетворяющая краевым (граничным) условиям для расчетной схемы, приведенной на рис. 1.

Решение представленного уравнения колебаний (3) будем отыскивать при следующих краевых условиях:

$$-m \frac{\partial^2 u(0, t)}{\partial t^2} - b \frac{\partial u(0, t)}{\partial t} - cu(0, t) + EF \frac{\partial u(0, t)}{\partial z} + \eta F \frac{\partial u(0, t)}{\partial t} - \rho H_1 F \frac{\partial^2 u(0, t)}{\partial t^2} + \mu Fu(0, t) = Q \sin \omega t; \quad (5)$$

$$\sigma(H, t) = E \frac{\partial u(H, t)}{\partial z} + \eta \frac{\partial u(H, t)}{\partial t} - \rho H_1 \frac{\partial^2 u(H, t)}{\partial t^2} + \mu u(H, t) = 0, \quad (6)$$

где m – масса подвижной рамы вместе с формой; c , b – коэффициенты жесткости и неупругого сопротивления амортизаторов в вертикальном направлении; F – площадь днища формы, контактирующая с уплотняемым материалом; H_1 – приведенная высота уплотняемого слоя; H – высота уплотняемого слоя.

Первое краевое условие (5) описывает взаимодействие днища формы с уплотняемой бетонной смесью, а второе краевое условие (6) показывает, что на свободной поверхности уплотняемой смеси напряжение равно нулю. На основании функции (4) выражение $Q \sin \omega t$ в краевом условии (5) может быть представлено в виде мнимой части комплексной функции, т.е. $Q \sin \omega t = Q e^{i\omega t}$.

Подставляя функцию (4) в волновое уравнение (3), и после преобразования получим уравнение для определения комплексной амплитуды колебаний:

$$\frac{\partial^2 U(z)}{\partial z^2} + 2(\delta + i\xi) \frac{\partial U(z)}{\partial z} + \frac{\rho\omega^2}{E} U(z) = 0, \quad (7)$$

где δ – коэффициент затухания возмущения в уплотняемом слое бетонной смеси; ξ – коэффициент диссипации,

$$\delta = \frac{\mu + \rho H_1 \omega^2}{2E}; \quad \xi = \frac{\eta \omega}{2E}. \quad (8)$$

Найдем корни характеристического уравнения, составленного для уравнения (7), т.е.

$$k_{1-2} = -(\delta + i\xi) \pm i \sqrt{\frac{\rho\omega^2}{E} + \xi^2 - \delta^2 - 2i\delta\xi}. \quad (9)$$

Используя выражение (9), найдем решение уравнения (8) в следующей форме:

$$U(z) = e^{(\delta + i\xi)z} (B e^{\tilde{k}z} + D e^{-\tilde{k}z}), \quad (10)$$

где B и D – постоянные интегрирования (комплексные величины), определяемые из краевых условий (5) и (6); \tilde{k} – комплексное волновое число,

$$\tilde{k} = \sqrt{\frac{\rho\omega^2}{E} + \xi^2 - \delta^2 - 2i\delta\xi}. \quad (11)$$

Представим комплексное волновое число \tilde{k} в следующем виде [8]:

$$\tilde{k} = k - i\alpha, \quad (12)$$

где k – волновое число; α – коэффициент поглощения, характеризующий уменьшение амплитуды возмущения при удалении от источника вибрационного воздействия.

Для определения волнового числа k и коэффициента поглощения α приравняем выражения (12) и (11) и после преобразования путем выделения отдельно мнимой и вещественной частей, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} k^2 - \alpha^2 = \chi; \\ \alpha k = \delta \xi. \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{где } \chi = \frac{\rho\omega^2}{E} + \xi^2 - \delta^2.$$

Из системы уравнений (13) найдем:

$$k = \sqrt{0,5\chi + \sqrt{0,25\chi^2 + \xi^2\delta^2}}; \quad (14)$$

$$\alpha = \sqrt{-0,5\chi + \sqrt{0,25\chi^2 + \xi^2\delta^2}}. \quad (15)$$

Используя выражения (10) и (12), представим решение уравнения (7) в следующем виде:

$$U(z) = e^{-(\delta + i\xi)z} [B e^{(ik + \alpha)z} + D e^{-(ik + \alpha)z}]. \quad (16)$$

При подстановке зависимости (16) в комплексную функцию (4), найдем решение уравнения (2) в следующей комплексной форме:

$$u(z, t) = e^{-\delta z} [B e^{(ik + \alpha)z} + D e^{-(ik + \alpha)z}] e^{i(\omega t - \xi z)}. \quad (17)$$

Подставим зависимость (17) в краевое условие (6) и, после преобразования, найдем соотношение между постоянными интегрирования B и D :

$$B = -D \frac{e^{-(ik + \alpha)H} [(\delta - \alpha) - i(k - \xi)]}{e^{(ik + \alpha)H} [(\delta + \alpha) + i(k + \xi)]}. \quad (18)$$

Подставляя зависимость (18) в выражение (17), найдем решение уравнения (3) в следующем виде:

$$u(z, t) = D e^{-\delta z + i(\omega t - \xi z)} \times \left\{ e^{(\alpha + ik)(H - z)} - \frac{e^{-(\alpha + ik)(H - z)} [(\delta - \alpha) - i(k - \xi)]}{e^{(\alpha + ik)H} [(\delta + \alpha) + i(k + \xi)]} \right\}. \quad (19)$$

Подставим зависимость (19) в краевое условие (5) и после преобразований найдем комплексную постоянную интегрирования D :

$$D = \frac{Q e^{(\alpha + ik)H} [(\delta + \alpha) + i(k + \xi)]}{(R + iS) \{ [c + c_b - (m + m_b)\omega^2] + i(b + b_b)\omega \}}, \quad (20)$$

где R – действительная часть образованной комплексной функции; S – мнимая часть образованной комплексной функции,

$$R = 2[(\delta \cdot \text{sh}\alpha H + \alpha \cdot \text{ch}\alpha H) \cos kH - (k \cdot \text{ch}\alpha H + \xi \cdot \text{sh}\alpha H) \sin kH]; \quad (21)$$

$$S = 2[(k \cdot \text{ch}\alpha H + \xi \cdot \text{sh}\alpha H) \cos kH - (\delta \cdot \text{ch}\alpha H + \alpha \cdot \text{sh}\alpha H) \sin kH], \quad (22)$$

где c_b – приведенная жесткость уплотняемой бетонной смеси; m_b – приведенная масса уплотняемой бетонной смеси; b_b – приведенный коэффициент неупругого сопротивления уплотняемой бетонной смеси,

$$c_b = \frac{1}{R^2 + S^2} \left\{ 2EF\alpha[(\delta^2 + \alpha^2 + k^2 + \xi^2)sh(2\alpha H) + 2(\delta\alpha + k\xi)ch(2\alpha H)] + 2EFk[(\delta^2 + \alpha^2)ch(2\alpha H) + 2\delta\alpha \cdot sh(2\alpha H) + 2k\delta \cdot sh(2\alpha H)] \right\}; \quad (23)$$

$$m_b = F \left(\frac{\mu}{\omega^2} + 0,5\rho_n H_1 \right) + \frac{2EF}{\omega^2(R^2 + S^2)} \times \{ 2k[(\delta k + \alpha \xi)sh(2\alpha H) + (\delta \xi + \alpha k)ch(2\alpha H)] \sin^2 kH + \alpha(k - \xi)(\delta - \alpha)e^{-2\alpha H} \sin(2kH) \}; \quad (24)$$

$$b_b = \frac{2EFk}{\omega(R^2 + S^2)} \{ [(\delta^2 + \alpha^2)sh(2\alpha H) + 2\delta\alpha sh(2\alpha H)] \times \cos(2\alpha H) + (k^2 + \xi^2)sh(2\alpha H) + 2k\xi ch(2\alpha H) - [(\delta k + \alpha \xi)ch(2\alpha H) + (\delta \xi + \alpha k)sh(2\alpha H) + (k\alpha - \delta \xi)] \times \sin(2kH) \} - \frac{2EF\alpha}{\omega(R^2 + S^2)} [2(k\delta - \xi\alpha) \cos^2 kH + 2(k\alpha - \xi\delta) \sin^2 kH + (\delta^2 - \alpha^2) \sin(2kH)] - 0,5\eta F. \quad (25)$$

Подставляя постоянную интегрирования D (20) в зависимость (19), найдем решение волнового уравнения колебаний (3), удовлетворяющего краевым условиям (5) и (6), в комплексной форме:

$$u(z, t) = \frac{Qe^{-\delta z + i(\omega t - \xi z)}}{(R + iS) \{ [c + c_b - (m + m_b)\omega^2] + i(b + b_b)\omega \}} \times \{ e^{(\alpha + ik)(H-z)} [(\delta + \alpha) + i(k + \xi)] - e^{-(\alpha + ik)(H-z)} [(\delta - \alpha) - i(k - \xi)] \}. \quad (26)$$

Умножим числитель и знаменатель выражения (26) на комплексные числа $[c + c_b - (m + m_b)\omega^2] - i(b + b_b)\omega$ и $R - iS$, сопряженные комплексным числам, которые находятся в знаменателе и, выделяя из полученной зависимости мнимую часть образованной комплексной функции и преобразовывая её, получим искомое решение волнового уравнения (3), удовлетворяющее краевым условиям (5) и (6), в следующей форме:

$$u(z, t) = \frac{Ae^{-\delta z}}{\sqrt{R^2 + S^2}} \times$$

$$\left\{ [e^{\alpha(H-z)}(\delta + \alpha) - e^{-\alpha(H-z)}(\delta - \alpha)] \cos k(H-z) -$$

$$- [e^{\alpha(H-z)}(k + \xi) + e^{-\alpha(H-z)}(k - \xi)] \sin k(H-z) \} \times \sin(\omega t - \xi z - \varphi) + \{ [e^{\alpha(H-z)}(k + \xi) + e^{-\alpha(H-z)}(k - \xi)] \cos k(H-z) + [e^{\alpha(H-z)}(\delta + \alpha) + e^{-\alpha(H-z)}(\delta - \alpha)] \sin k(H-z) \} \times \cos(\omega t - \xi z - \varphi), \quad (27)$$

где A – амплитуда вынужденных колебаний вибрационной площадки; φ – сдвиг фаз между амплитудой возмущающей силы и перемещениями,

$$A = \frac{Q}{\sqrt{[c + c_b - (m + m_b)\omega^2]^2 + (b + b_b)^2 \omega^2}}; \quad (28)$$

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2; \quad (29)$$

$$\varphi_1 = \arctg \frac{(b + b_b)\omega}{c + c_b - (m + m_b)\omega^2}; \quad \varphi_2 = \arctg \frac{S}{R}. \quad (30)$$

Используя в выражении [27] замену экспоненциальных членов на гиперболические функции, получим решение волнового уравнения (3) в форме, удобном для вычисления на ЭВМ:

$$u(z, t) = \frac{2Ae^{-\delta z}}{\sqrt{R^2 + S^2}} \times$$

$$\begin{aligned} & \times \{ \{ [\delta \cdot ch[\alpha(H-z)] + \alpha \cdot sh[\alpha(H-z)]] \cos k(H-z) - \\ & - [k \cdot ch[\alpha(H-z)] + \xi \cdot sh[\alpha(H-z)]] \sin k(H-z) \} \times \\ & \times \sin(\omega t - \xi z - \varphi) + \\ & + \{ [k \cdot ch[\alpha(H-z)] + \xi \cdot sh[\alpha(H-z)]] \cos k(H-z) + \\ & + [\delta \cdot ch[\alpha(H-z)] + \alpha \cdot sh[\alpha(H-z)]] \sin k(H-z) \} \times \\ & \times \cos(\omega t - \xi z - \varphi) \}. \quad (31) \end{aligned}$$

Полученные решения (27) и (31) волнового уравнения (3), удовлетворяющие краевым условиям (5) и (6), описывают закон колебаний уплотняемого слоя бетонной смеси изучаемой динамической системы “Вибрационная площадка – уплотняемая среда” в зависимости от координаты z , т.е. при $H \leq z \leq 0$. При $z = 0$ эти зависимости описывают закон колебания нижнего слоя смеси и одновременно подвижной рамы вибрационной площадки:

$$u(0, t) = A \sin(\omega t - \varphi_1). \quad (32)$$

При $z = H$ зависимости (27) и (31) описывают закон колебания верхнего слоя бетонной смеси, т.е.

$$u(H, t) = 2Ae^{-\delta H} \sqrt{\frac{\alpha^2 + k^2}{R^2 + S^2}} \sin(\omega t - \xi H - \varphi + \varsigma), \quad (33)$$

где

$$\varsigma = \arctg \frac{k}{\alpha}. \quad (34)$$

Подставляя выражение (31) в зависимость (1), определим закон изменения напряжений, возникающих в уплотняемом слое бетонной смеси, т.е.

$$\begin{aligned} \sigma(z, t) = & \frac{2Ae^{-\delta z}}{\sqrt{R^2 + S^2}} \left\{ (\delta^2 + \xi^2) sh^2[\alpha(H-z)] + \right. \\ & + (\alpha^2 + k^2) ch^2[\alpha(H-z)] + (\alpha\delta + k\xi) sh[2\alpha(H-z)] \left. \right\}^{0,5} \times \\ & \times \sqrt{(\mu + \rho H_1 \omega^2 - E\alpha)^2 + (0,5\eta\omega)^2} \left\{ \cos[k(H-z) + \right. \\ & + \theta(z)] \sin(\omega t - \xi z - \varphi + \varphi_3) + \\ & + \sin[k(H-z) + \theta(z)] \cos(\omega t - \xi z - \varphi + \varphi_3) \left. \right\} + \\ & + Ek \left\{ \sin[k(H-z) + \theta(z)] \sin(\omega t - \xi z - \varphi) - \right. \\ & \left. - \cos[k(H-z) + \theta(z)] \cos(\omega t - \xi z - \varphi) \right\}, \quad (35) \end{aligned}$$

где $\varphi_3, \theta(z)$ – углы сдвига фаз,

$$\begin{aligned} \varphi_3 = & \arctg \frac{0,5\eta\omega}{\mu + \rho H_1 \omega^2 - E\alpha}; \\ \theta(z) = & \arctg \frac{k \cdot ch[\alpha(H-z)] + \xi \cdot sh[\alpha(H-z)]}{\delta \cdot sh[\alpha(H-z)] + \alpha \cdot ch[\alpha(H-z)]}. \end{aligned}$$

Из выражения (35) найдем закон изменений напряжений, возникающих в основании уплотняемого слоя бетонной смеси,

$$\begin{aligned} \sigma(0, t) = & \frac{2A \sin(\omega t + kH - \varphi + \theta_1)}{\sqrt{R^2 + S^2}} \times \\ & \times \left\{ (\delta^2 + \xi^2) sh^2(\alpha H) + (\alpha^2 + k^2) ch^2(\alpha H) + \right. \\ & \left. + (\alpha\delta + k\xi) sh(2\alpha H) \right\}^{0,5} \times \\ & \times \sqrt{(\mu + \rho H_1 \omega^2 - E\alpha)^2 + (0,5\eta\omega)^2 + k^2 E^2}, \quad (36) \end{aligned}$$

где θ_1 – угол сдвига фаз,

$$\theta_1 = \arctg \frac{\sqrt{(\mu + \rho H_1 \omega^2 - E\alpha)^2 + (0,5\eta\omega)^2} \sin \varphi_3 + kE}{\sqrt{(\mu + \rho H_1 \omega^2 - E\alpha)^2 + (0,5\eta\omega)^2} \cos \varphi_3}.$$

Полученные выражения (23–25) могут использоваться для континуально-дискретной расчетной модели [10], описывающей взаимодействие вибрационных площадок разных конструкций с бетонной смесью при различных способах вибрационного воздействия, конфигурации уплотняемого изделия, частоты и амплитуды вынужденных колебаний подвижной рамы виброплощадки, и различный значениях консистенции уплотняемой среды.

ВЫВОДЫ. На основе анализа существующих методов уплотнения бетонных смесей рассмотрена

схема вибрационного уплотнения бетонных смесей на виброплощадке с вертикально направленными колебаниями. Составлена математическая модель динамической системы вибрационной площадки при её взаимодействии с бетонной смесью. Определена закономерность движения уплотняемой смеси и вибрационной площадки в зависимости от физико-механических характеристик уплотняемой среды, толщины уплотняемого слоя, амплитуды и угловой частоты колебаний, геометрических параметров вибрационной машины. Приведенные зависимости позволяют обосновать рациональные параметры предлагаемой вибрационной машины и режимы вибрационного воздействия на бетонную среду.

ЛИТЕРАТУРА

1. Назаренко И. И. Высокоэффективные формовочные машины. К.: Вища школа, 1988. 140 с.
2. Маслов А. Г., Саленко Ю. С. Вибрационные машины и процессы в дорожно-строительном производстве: монография. Кременчуг: ПП Щербатих О. В., 2014. 262 с.
3. Волков С. А., Евтюков С. А. Строительные машины. СПб.: ДНК, 2012. 597 с.
4. Маслов А. Г., Иткин А. Ф., Саленко Ю. С. Вибрационные машины для приготовления и уплотнения бетонных смесей: монография. Кременчуг: ЧП Щербатых А. В., 2014. 324 с.
5. Juradin S., Baloević G., Harapin A. Impact of Vibrations on the Final Characteristics of Normal and Self-compacting Concrete. *Journal of Materials Research*. 2014, Vol. 17(1), pp. 178–185.
6. Sudarshan N. M., Chandrashekar Rao T. Vibration Impact on Fresh Concrete of Conventional and UHPFRC. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, Vol. 12, 8th edn, pp. 1683–1690.
7. Koh H. B., Yeoh D., Shahidan S. Effect of re-vibration on the compressive strength and surface hardness of concrete. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017, Vol. 271, 012057, pp. 1–6.
8. Маслов А. Г., Жанар Батсайхан. Теоретические исследования взаимодействия плоскостного глубинного виброуплотнителя с бетонной смесью. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2018. Вип. 2(109), част. 1. С. 48–53.
9. Gutierrez J., Ruiz E., Trochu F. High-frequency vibrations on the compaction of dry fibrous reinforcements. *Journal of Advanced Composite Materials*. 2013, Vol. 22(1), pp. 13–27.
10. Maslov A., Janar Batsaikhan, Puzyr R., Salenko Yu. The Determination of the Parameters of a Vibration Machine for the Internal Compaction of Concrete Mixtures. *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, Vol. 7(4.3), pp 12–19.
11. Maslov O., Janar Batsaikhan, Salenko Yu. The Theory of Concrete Mixture Vibratory Compacting. *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, Vol. 7(3.2), pp 239–244.

DEVELOPMENT OF THE THEORY OF INTERACTION OF
THE VIBRATING PLATFORM WITH CONCRETE MIX

Janar Batsaikhan

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: kmto.43@gmail.com

Purpose. The article aims to determine theoretical means of character of interaction of the vibrating platform with a concrete mix. **Methodology.** On the basis of the analysis of existing methods of compaction of concrete mixes the scheme of vibration compaction of concrete mixes on vibroplats with vertically directed vibrations containing the mobile frame which is established on a basic frame by means of elastic shock absorbers is considered. In the lower part of the movable frame there is Wbrzburg directional fluctuations mounted, and on its surface it is form-fitted to the concrete mixture. To determine the nature of the interaction between the vibrational ground with concrete mixture the study of the dynamic system "shaking table-concrete environment" in which the latter is represented as a system with distributed parameters taking into account elastic, viscous, inertial and energy properties of the formed concrete mix. A partial differential equation describing the change in the compacted medium stress depending on the dynamic elastic deformation modulus, the dynamic viscosity coefficient, the inelastic resistance coefficient and the inertia of the compacted medium in functional dependence on the density, relative deformation and consistency of the concrete mixture has been compiled. A wave equation of oscillations describing the propagation of visco-elastic-plastic deformation waves in the compacted concrete mixture between the bottom of the mold and the free surface of the compacted medium is compiled. Boundary conditions were used to solve the wave equation of oscillations. The first boundary condition describes the interaction of the bottom of the mold with the compacted concrete mixture, and the second boundary condition shows that the concrete surface is free. Found the constant of integration (complex function), satisfying the boundary conditions. **Results.** On the basis of the solution of the wave equation vibrations, describing distribution of waves of deformation, defined: the law of propagation of viscous-elastic-plastic waves of deformations in the sealing of the concrete mixture and given values of stiffness, mass, and coefficient of inelastic resistance of concrete, which is designed for use in continuous-discrete computational models describing interaction of vibrating platforms with a concrete mixture into the form with different methods of vibration exposure, configuration of the compacted product and different values of the surface area of the interaction of the working body (bottom of the mold) with the concrete medium, the frequency and amplitude of oscillations. **Originality.** The obtained dependences will allow to justify the rational parameters of the vibration platform and modes of vibration impact on the environment depending on the form and type of vibration action. **Practical.** The obtained research results allow: to justify the rational parameters of the vibration platform; to find rational modes of vibration impact on concrete mixtures of different consistency. The proposed method of calculation can be widely used in the practice of designing vibration machines for compaction of concrete mixtures.

Key words: vibration platform, concrete mix, interaction, law of vibrations.

REFERENCES

1. Nazarenko, I. I. (1988), *Vysokoeffektivnye formovochnye mashiny* [High efficiency molding machines], Vysha shkola, Kiev, Ukraine.
2. Maslov, A. G., Salenko, Y. S. (2014), *Vibratsionnye mashiny i protsessy v dorozhno-stroitel'nom proizvodstve* [Vibrating machines and processes in road construction industry: monography], PP Cherbatyh, Kremenchuk, Ukraine.
3. Volkov, S. A., Evtuykov, S. A. (2012), *Stroitel'nye mashiny* [Construction machinery], "DNK", SPb, Russia.
4. Maslov, A. G., Itkin, A. F., Salenko, Y. S. (2014), *Vibratsionnye mashiny dlya prigotovleniya i uplotneniya betonnykh smesey* [Vibrating machines for the preparation and compaction of concrete mixes], PP Cherbatyh, Kremenchuk, Ukraine.
5. Juradin, S., Baloević, G., Harapin, A. (2014), Impact of Vibrations on the Final Characteristics of Normal and Self-compacting Concrete, *Journal of Materials Research*, Vol 17(1), pp. 178-185.
6. Sudarshan, N. M., Chandrashekar, R. T. (2017), Vibration Impact on Fresh Concrete of Conventional and UHPFRC, *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 12, 8thedn, pp. 1683-1690.
7. Koh, H.B., Yeoh, D., Shahidan, S., (2017), Effect of re-vibration on the compressive strength and surface hardness of concrete, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Vol 271, 012057, pp. 1 – 6.
8. Maslov, A. G., Batsaikhan, Z. (2018), "Theoretical studies of the interaction of planar deep vibroplates with concrete mixture", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. Kremenchug: KRNU*, Issue (109), pp. 48 – 53.
9. Gutierrez, J., Ruiz, E., Trochu, F. (2013), High-frequency vibrations on the compaction of dry fibrous reinforcements, *Journal of Advanced Composite Materials*, Vol. 22 (1), pp. 13 – 27.
10. Maslov, A., Batsaikhan, J., Puzyr, R., Salenko, Yu. (2018), The Determination of the Parameters of a Vibration Machine for the Internal Compaction of Concrete Mixtures, *International Journal of Engineering & Technology*, Vol. 7 (4.3), pp 12-19.
11. Maslov, O., Batsaikhan, J., Salenko, Yu. (2018), The Theory of Concrete Mixture Vibratory Compacting, *International Journal of Engineering & Technology*, Vol. 7 (3.2), pp 239-244.

Стаття надійшла 18.11.2019.