

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ С ВЕРТИКАЛЬНЫМИ СТЕНКАМИ ВИБРАЦИОННОЙ ФОРМЫ

А. Г. Маслов, В. П. Лукьяненко

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, 39600, м. Кременчуг, Украина. E-mail: knto@mail.ru

Составлена математическая модель динамической системы "Вибрационная форма – уплотняемая среда", в которой вибрационная форма выполнена без дна, а уплотняемая среда представлена в виде системы с распределенными параметрами. В результате решения волнового уравнения колебаний, удовлетворяющего заданным граничным условиям, определена закономерность деформирования уплотняемой среды по всей толщине уплотняемого слоя в зависимости от нарастающей во времени плотности формируемой смеси, её физико-механических характеристик, толщины уплотняемого слоя, массы вибрационной формы, частоты и амплитуды возмущающей силы. Определены коэффициенты упругого и неупругого сопротивления бетонной смеси, действующего на вертикальные стенки вибрационной формы без дна в зависимости от относительной плотности бетонной смеси, её консистенции и толщины уплотняемого слоя. Определена амплитуда колебаний вибрационной формы.

Ключевые слова: вибрационная форма, колебания, закон движения, уплотняемая среда.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ БЕТОННОЇ СУМІШІ З ВЕРТИКАЛЬНИМИ СТІНКАМИ ВІБРАЦІЙНОЇ ФОРМИ

О. Г. Маслов, В. П. Лукьяненко

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна. E-mail: knto@mail.ru

Складено математичну модель динамічної системи "Вібраційна форма – ущільнюване середовище", в якій вібраційна форма виконана без дна, а ущільнюване середовище представлено у вигляді системи з розподіленими параметрами. В результаті рішення хвильового рівняння коливань, що задовольняє заданим граничним умовам, визначена закономірність деформування ущільнюваного середовища по всій товщині ущільнюваного шару залежно від наростаючої у часі щільності формованої суміші, її фізико-механічних характеристик, товщини ущільнюваного шару, маси вібраційної форми, частоти і амплітуди, що збуджує сили. Визначено коефіцієнти пружного і непружного опору бетонної суміші, діючого на вертикальні стінки вібраційної форми без дна залежно від відносної щільності бетонної суміші, її консистенції і товщини ущільнюваного шару. Визначено амплітуда коливань вібраційної форми.

Ключові слова: вібраційна форма, коливання, закон руху, ущільнюване середовище.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Физико-механические характеристики уплотняемой среды во многом определяют поведение динамической системы вибрационной машины и существенно влияют на определение её основных параметров [1–3]. Достаточно точное определение упругих, диссипативных и инерционных сил, действующих на вертикальные стенки вибрационной формы со стороны формируемой смеси при горизонтальных колебаниях, позволяет определить устойчивый режим работы вибрационной машины, правильно выбрать технологические параметры вибрационного воздействия на обрабатываемую среду, использование которых обеспечивает эффективное уплотнение с малой энергоёмкостью. В проведенных ранее исследованиях физико-механические характеристики уплотняемой среды, взаимодействующей с вибрационной машиной, были представлены моделью Гука [4], моделью Сен-Венана или вязкоупругой моделью Кельвина – Фогта [5]. Эти модели не в полной мере могут описать реакцию формируемой среды на вертикальные стенки вибрационной формы, что не позволяет определить рациональные параметры вибрационной машины и режимы вибрационного воздействия с точностью, достаточной для инженерных расчетов. Представление формируемой среды в виде сплошной среды, которую можно описать математическими моделями, составленными из

множества элементов Сен-Венана или Кельвина – Фогта [1, 6], дает более точное описание упругих и диссипативных свойств уплотняемой среды в процессе вибрационного воздействия. В работах [6, 7] приведены исследования колебаний динамических систем, в которых учитывается действие уплотняемой среды на вибрационную машину в виде сил, характеризующих упругие, инерционные и диссипативные свойства. Это дает положительные результаты при уплотнении смеси вибрирующей плитой, деформирующей уплотняемую среду в вертикальном направлении. При исследовании взаимодействия вертикальных стенок формы без дна с бетонной смесью в горизонтальном направлении необходимо учитывать разность нагружения на уплотняемый слой при его сжатии и растяжении, возникающее на противоположных вертикальных стенках формы. Поэтому для обоснования рациональных параметров вибрационной машины необходимо точно определить закономерность деформирования формируемой среды вертикальными стенками формы и установить закон движения вибрационной формы, используемой для изготовления строительных блоков.

Цель работы – исследование взаимодействия бетонной смеси с вертикальными стенками формы без дна при горизонтально направленных колебаниях.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для определения сил сопротивления, возник-

каючих в процесі ущільнення, розглянемо розрахункову схему динамічної системи "Виброформа – ущільнювана середовище" (рис. 1), включаючої вібраційну форму 1 без дна, установлену на жорсткому основанні 2 і заповнену бетонною сумішшю 3. На передню вертикальну стінку форми діє горизонтально направлена гармонічна сила $Q \sin \omega t$, під дією якої здійснюється ущільнення суміші 3. При цьому залежність між напруженнями і деформаціями в ущільнюваній середовищі опишемо відомим рівнянням []:

$$\sigma(y,t) = E \frac{\partial u(y,t)}{\partial y} + \eta \frac{\partial^2 u(y,t)}{\partial y \partial t}, \quad (1)$$

де $\sigma(y,t)$ – напруження, виникаючі в ущільнюваній середовищі; u – переміщення ущільнюваного шару суміші в залежності від поточної координати y , т.е. u і y – це ейлерова і лагранжева координати; E – динамічний модуль пружності ущільнюваній бетонній суміші, повільно змінюваний параметр в залежності від зростаючої в процесі ущільнення густоти бетонної суміші; η – поточний коефіцієнт динамічної в'язкості бетонної суміші, враховуючий внутрішнє тертя бетонної суміші, повільно змінюваний параметр.

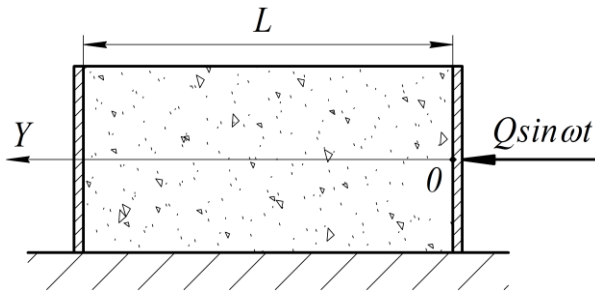


Рисунок 1 – Розрахункова схема динамічної системи "Виброформа – ущільнювана середовище"

На основі вираження (1) рух ущільнюваній суміші в напрямку координати y і во часі t опишемо хвильовим рівнянням коливань [1, 8]:

$$E \frac{\partial^2 u(y,t)}{\partial y^2} + \eta \frac{\partial^3 u(y,t)}{\partial y^2 \partial t} = \rho \frac{\partial^2 u(y,t)}{\partial t^2}, \quad (2)$$

де ρ – густина бетонної суміші, повільно змінюваний параметр.

Для розв'язання хвильового рівняння коливань (2) представимо функцію $u(y,t)$ в формі мнимі частини комплексної функції [9]:

$$u(y,t) = U(y)e^{i\omega t}, \quad (3)$$

де $U(y)$ – комплексна амплітуда коливань, задовольняюча граничним умовам розглянутої динамічної системи.

Поведіння розглянутої динамічної системи буде залежати від граничних умов. В результаті переміщення виброформи в напрямку по координаті Y від нульового положення, передня стінка, маюча координату $y=0$, осу-

ществляє стиснення ущільнюваній бетонній суміші, а задня стінка, маюча координату $y=L$ і переміщується в тому ж напрямку, буде діяти на ущільнювану суміш розтягуюче вплив. При цьому граничні умови будуть мати вигляд:

$$-m \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial t^2} + \eta F \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial y \partial t} + EF \frac{\partial u(0,t)}{\partial y} = -Qe^{i\omega t}; \quad (4)$$

$$\eta F \frac{\partial^2 u(L,t)}{\partial y \partial t} + EF \frac{\partial u(L,t)}{\partial y} = -\sigma_0 F e^{i\omega t}, \quad (5)$$

де m – маса виброформи, разом з масою вібровозбудителя коливань; F – площа однієї стінки виброформи, контактуюча з ущільнюваній середовищем; L – довжина форми шару; σ_0 – напруження ущільнюваній середовищі, виникаючі при контакті з задньою стінкою в момент руху виброформи в прямому напрямку по координаті Y .

При зворотному русі виброформи стиснення бетонної суміші будуть спостерігатися у задній стінці, а розтягуючі напруження у передній кромці.

Оскільки виброформу можна вважати абсолютно жорсткою (недеформованою) тілом, то закон руху виброформи буде однаковим, як при прямому, так і зворотному її переміщенні, т.е. симетричним. Тому достатньо буде розглянути тільки рух виброформи в одному напрямку при граничних умовах (4) і (5).

Використовуючи функцію (3) в хвильове рівняння коливань (2), отримаємо рівняння для визначення комплексної амплітуди коливань $U(y)$, т.е.

$$\frac{\partial^2 U(y)}{\partial y^2} + \frac{\rho \omega^2}{E + i\eta \omega} U(y) = 0. \quad (6)$$

Використовуючи методику, представлену в роботі [84], визначимо з рівняння (6) комплексну амплітуду

$$U(y) = B e^{-(\alpha + ik)y} + D e^{(\alpha + ik)y}, \quad (7)$$

підставляючи яку в вираження (3), знайдемо рішення хвильового рівняння коливань в наступному загальному вигляді:

$$U(y) = [B e^{-(\alpha + ik)y} + D e^{(\alpha + ik)y}] e^{i\omega t}. \quad (8)$$

Здесь B і D – постійні інтегрування (комплексні амплітуди), визначаються граничними умовами (4) і (5); k – хвильове число, $k = \omega/a$; a – фазова швидкість поширення збурення в ущільнюваній середовищі.

Фазову швидкість поширення збурення a і коефіцієнт затухання збурення α в ущільнюваній середовищі, можна визначити з наступних залежностей [10]:

$$a = \sqrt{\frac{2(E^2 + \eta^2 \omega^2)}{\rho(E + \sqrt{E^2 + \eta^2 \omega^2})}}; \quad (9)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\rho\omega^2(-E + \sqrt{E^2 + \eta^2\omega^2})}{2(E^2 + \eta^2\omega^2)}}. \quad (10)$$

Подставляя выражение (8) в граничное условие (5), выразим одну комплексную постоянную интегрирования B через другую комплексную постоянную интегрирования D , т.е.

$$B = D \frac{e^{(\alpha+ik)L}}{e^{-(\alpha+ik)L}} + \frac{\sigma_0}{(\alpha+ik)(E+i\eta\omega)e^{-(\alpha+ik)L}}. \quad (11)$$

На основании зависимости (11), подставляя которую в выражение (8), получим решение волнового уравнения колебаний (2) в следующей общей форме:

$$u(y,t) = \left[D \frac{e^{(\alpha+ik)(L-y)} + e^{-(\alpha+ik)(L-y)}}{e^{-(\alpha+ik)L}} + \frac{\sigma_0 e^{-(\alpha+ik)y}}{(\alpha+ik)(E+i\eta\omega)e^{-(\alpha+ik)L}} \right] \cdot e^{i\omega t}. \quad (12)$$

Путем подстановки зависимости (12) в граничное условие (4) найдем постоянную интегрирования D :

$$D = 0,5Qe^{-(\alpha+ik)L} / \{-m\omega^2 ch[(\alpha+ik)L] + (\alpha+ik) \times sh[(\alpha+ik)L] \cdot (EF+i\eta\omega F)\} + 0,5\sigma_0 [m\omega^2 - (\alpha+ik)(EF+i\eta\omega F)] / \{(\alpha+ik) \times (E+i\eta\omega) \{-m\omega^2 ch[(\alpha+ik)L] + (\alpha+ik) \times sh[(\alpha+ik)L] \cdot (EF+i\eta\omega F)\}\}. \quad (13)$$

Подставляя выражение (13) в функциональную зависимость (12) найдем решение волнового уравнения колебаний в следующей комплексной форме:

$$u(y,t) = \langle Q \{ ch[\alpha(L-y)] \cos k(L-y) + i \cdot sh[\alpha(L-y)] \sin k(L-y) \} / (M+i \cdot N) + \sigma_0 [m\omega^2 - (\alpha+ik)(EF+i\eta\omega F)] \times \{ ch[\alpha(L-y)] \cos k(L-y) + i \cdot sh[\alpha(L-y)] \times \sin k(L-y) \} / \{ M(\alpha E - k\eta\omega) - N(kE + \alpha\eta\omega) + i \cdot [M(kE + \alpha\eta\omega) + N(\alpha E - k\eta\omega)] \} + \{ \sigma_0 e^{\alpha(L-y)} [\cos k(L-y) + i \cdot \sin k(L-y)] \} / [(\alpha E - k\eta\omega) + i \cdot (kE + \alpha\eta\omega)] \rangle e^{i\omega t}, \quad (14)$$

где

$$M = ch\alpha L \cos kL \{ [(\alpha E - k\eta\omega) th\alpha L - (kE + \alpha\eta\omega) tgkL] F - m\omega^2 \}; \quad (15)$$

$$N = ch\alpha L \cos kL \{ [(\alpha E - k\eta\omega) tgkL + (kE + \alpha\eta\omega) th\alpha L] F - m\omega^2 th\alpha L \cdot tgkL \}. \quad (16)$$

Умножая числители и знаменатели зависимости (14) на выражения, сопряженные комплексным выражениям знаменателей, и выделяя из полученной зависимости мнимую часть, найдем искомое решение волнового уравнения колебаний (2), удовлетворяющее граничным условиям (4) и (5), т.е.

$$u(y,t) = Q \{ ch[\alpha(L-y)] \cos k(L-y) \sin(\omega t - \varphi_1) + sh[\alpha(L-y)] \sin k(L-y) \cos(\omega t - \varphi_1) \} / \sqrt{M^2 + N^2} + \frac{\sigma_0 \sqrt{[m\omega^2 - (\alpha E - k\eta\omega)F]^2 + [(kE + \alpha\eta\omega)F]^2}}{\sqrt{(E^2 + \eta^2\omega^2)(k^2 + \alpha^2)(M^2 + N^2)}} \times \{ ch[\alpha(L-y)] \cos k(L-y) \sin(\omega t - \varphi_2) + sh[\alpha(L-y)] \sin k(L-y) \cos(\omega t - \varphi_2) \} + \sigma_0 e^{\alpha(L-y)} [\cos k(L-y) \sin(\omega t - \varphi_3) + \sin k(L-y) \cos(\omega t - \varphi_3)] / \sqrt{(E^2 + \eta^2\omega^2)(k^2 + \alpha^2)} \quad (17)$$

где $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – углы сдвига фаз;

$$\varphi_1 = \arctg \frac{N}{M};$$

$$\varphi_2 = \varphi_{21} + \varphi_{22};$$

$$\varphi_{21} = \arctg \frac{M(kE + \alpha\eta\omega) + N(\alpha E - k\eta\omega)}{M(\alpha E - k\eta\omega) - N(kE + \alpha\eta\omega)};$$

$$\varphi_{22} = \arctg \frac{(kE + \alpha\eta\omega)F}{m\omega^2 - (\alpha E - k\eta\omega)F};$$

$$\varphi_3 = \arctg \frac{kE + \alpha\eta\omega}{\alpha E - k\eta\omega}.$$

Полученное выражение (17) описывает закон движения рассматриваемой динамической системы «Виброформа – уплотняемая среда», т.е. описывает движение уплотняемой среды при значениях координаты $0 \leq y \leq L$. При $y=0$ выражение (17) описывает движение уплотняемой среды совместно с передней стенкой виброформы и соответственно движение самой виброформы в горизонтальном направлении:

$$u(0,t) = \frac{Q \sqrt{ch^2 \alpha L + \cos^2 kL}}{\sqrt{M^2 + N^2}} \sin(\omega t - \varphi_1 + \psi_1) + \frac{\sigma_0 \sqrt{[m\omega^2 - (\alpha E - k\eta\omega)F]^2 + [(kE + \alpha\eta\omega)F]^2}}{\sqrt{(E^2 + \eta^2\omega^2)(k^2 + \alpha^2)(M^2 + N^2)}} \times \sqrt{ch^2 \alpha L + \cos^2 kL} \sin(\omega t - \varphi_2 + \psi_1) + \frac{\sigma_0 e^{\alpha L}}{\sqrt{(E^2 + \eta^2\omega^2)(k^2 + \alpha^2)}} \sin(\omega t - \varphi_3 + \psi_3), \quad (18)$$

где ψ_1, ψ_3 – углы сдвига фаз;

$$\psi_1 = \arctg [th(\alpha L) tgkL]; \quad \psi_3 = \arctg (tgkL).$$

Движение уплотняемой среды в конце виброформы выражение (17) описывает при $y=L$, т.е.

$$u(L,t) = \frac{Q}{\sqrt{M^2 + N^2}} \sin(\omega t - \varphi_1) + \frac{\sigma_0 \sqrt{[m\omega^2 - (\alpha E - k\eta\omega)F]^2 + [(kE + \alpha\eta\omega)F]^2}}{\sqrt{(E^2 + \eta^2\omega^2)(k^2 + \alpha^2)(M^2 + N^2)}} \times \sin(\omega t - \varphi_2) + \frac{\sigma_0 e^{\alpha L}}{\sqrt{(E^2 + \eta^2\omega^2)(k^2 + \alpha^2)}} \sin(\omega t - \varphi_3). \quad (19)$$

Полученная зависимость (18) для определения перемещений виброформы в горизонтальном направлении имеет достаточно сложную форму и ее целесообразно упростить, заменив аппроксимирующей зависимостью. Для этого, используя зависимость (18), определим максимальное перемещение виброформы в горизонтальном направлении A_m , т.е. амплитуду колебаний виброформы. Это можно легко сделать при помощи любой системы программирования, путем последовательного определения перемещения виброформы через равные промежутки времени $\Delta t = \frac{\pi}{\omega n}$ и определения максимума. Для инженерных расчетов с достаточной степенью точности можно принять $n = 72$. Анализируя зависимость (15), представляющую вещественную часть комплексной функции, можно прийти к выводу, что выражение $k\eta\omega FtgkL$ представляет собой силу инерции F_{in} уплотняемого слоя бетонной смеси, т.е.

$$F_{in} = k\eta\omega FtgkL = \eta\omega^2 FtgkL/a. \quad (20)$$

Тогда из выражения (20) получим формулу для определения присоединенной (приведенной) массы бетонной смеси m_{pr}

$$m_{pr} = \eta FtgkL/a. \quad (21)$$

Поскольку все суммирующие члены выражения (18) представляют собой синусоидальные величины, то это выражение можно в первом приближении представить следующей аппроксимирующей зависимостью:

$$u_y(t) = A_m \sin(\omega t - \xi_1), \quad (22)$$

где $u_y(t)$ – аппроксимирующий закон перемещения виброформы в горизонтальном направлении по координате Y ; ξ_1 – аппроксимирующий угол сдвига между перемещением и амплитудой возмущающей силы.

Аппроксимирующая амплитуда колебаний виброформы, равная максимальному перемещению виброформы в горизонтальном направлении A_m , может быть найдена из следующего выражения:

$$A_m = \frac{Q}{\sqrt{[c - (m + m_{pr})\omega^2]^2 + b^2\omega^2}}, \quad (23)$$

где c и b – коэффициенты упругого и неупругого сопротивления бетонной смеси.

Из выражений (22) и (23) следует, что аппроксимирующий угол сдвига ξ_1 связывает основные параметры аппроксимирующей системы следующей зависимостью:

$$\xi_1 = \arctg \frac{b\omega}{c - (m + m_{pr})\omega^2}. \quad (24)$$

На основании выражений (18) и (22), принимая при $t=0$ $u_y(0) = u(0,0)$, найдем в первом приближении неизвестный угол ξ_1 :

$$\xi_1 = \arcsin \frac{u(0,0)}{A_m}, \quad (25)$$

где

$$u(0,0) = \frac{Q\sqrt{ch^2\alpha L + \cos^2 kL}}{\sqrt{M^2 + N^2}} \sin(\psi_1 - \varphi_1) + \frac{\sigma_0 \sqrt{[m\omega^2 - (\alpha E - k\eta\omega)F]^2 + [(kE + \alpha\eta\omega)F]^2}}{\sqrt{(E^2 + \eta^2\omega^2)(k^2 + \alpha^2)(M^2 + N^2)}} \times \sqrt{ch^2\alpha L + \cos^2 kL} \sin(\psi_1 - \varphi_2) + \frac{\sigma_0 e^{\alpha L}}{\sqrt{(E^2 + \eta^2\omega^2)(k^2 + \alpha^2)}} \sin(\psi_3 - \varphi_3). \quad (26)$$

Используя выражения (23) и (24), составим следующую систему уравнений для определения коэффициентов упругого c и неупругого b сопротивления бетонной смеси, т.е.

$$\begin{cases} [c - (m + m_{pr})\omega^2]^2 + b^2\omega^2 = Q^2 / A_m^2; \\ c - (m + m_{pr})\omega^2 = b\omega / tg\xi_1. \end{cases} \quad (27)$$

Откуда найдем:

$$c = (m + m_{pr})\omega^2 + Q / \left(A_m \sqrt{1 + tg^2\xi_1} \right); \quad (28)$$

$$b = Q \cdot tg\xi_1 / \left(A_m \omega \sqrt{1 + tg^2\xi_1} \right). \quad (29)$$

Коэффициент приведенной массы K_{pr} определим из следующего выражения:

$$K_{pr} = m_{pr} / m_b, \quad (30)$$

где m_b – масса бетонной смеси.

В табл. 1 приведены значения напряжения в уплотняемом слое σ_0 , возникающие при контакте с задней стенкой в момент движения виброформы в прямом направлении по координате Y (рис. 1), в зависимости от консистенции бетонной смеси.

Таблица 1 – Изменение значений σ_0 в зависимости от консистенции бетонной смеси

Консистенция смеси, с	ОК=3,5 – 4 см	30 с	60 с	90 с	120 с
σ_0 , кПа	5	4	3,5	3,0	2,5

На рис. 2–3 показаны изменения коэффициентов упругого c и неупругого b сопротивлений, а также коэффициента приведенной массы K_{pr} бетонных смесей с осадкой конуса ОК=3,5–4 см и жесткостью $J=30$ с при толщине уплотняемого слоя от 20 до 80 см в зависимости от относительной плотности смеси ε . Значения получены при амплитуде возмущающей силы $Q=0,98$ кН (100 кг), массе виброформы 14 кг, площади торцевой стенки формы $F=400$ см² и угловой частоте колебаний $\omega=292$ рад/с. Значения динамического модуля упругой деформации E и коэффициента динамической вязкости η бетонной смеси и их изменения в зависимости от относительной плотности бетонной смеси приведены в работе [10]. При этих параметрах на рис. 4 показано изменение амплитуды колебаний вибрационной формы в зависимости от относительной плотности смеси ε .

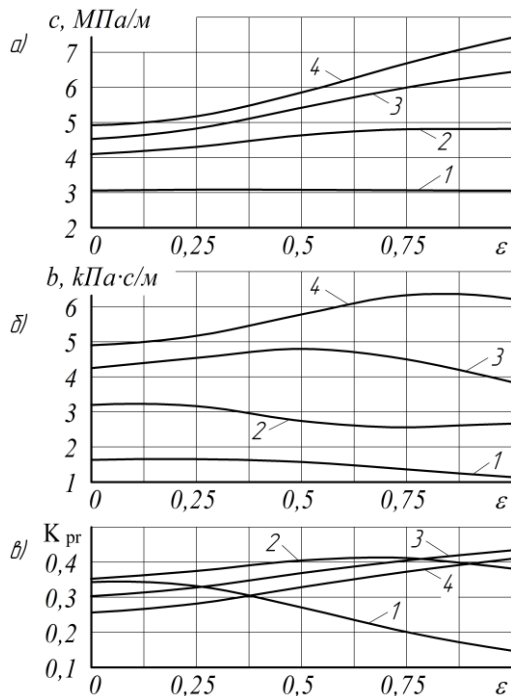


Рисунок 2 – Изменение коэффициентов упругого (а) и неупругого (б) сопротивления, а также коэффициента приведенной массы (в) бетонной смеси с осадкой конуса ОК=3,5–4 см в зависимости от относительной плотности смеси ε : 1 – при толщине уплотняемого слоя $L=20$ см; 2 – при $L=40$ см; 3 – при $L=60$ см; 4 – при $L=80$ см

Анализ приведенных зависимостей показывает, что для приведенных консистенций бетонной смеси значения удельных коэффициентов упругого и неупругого сопротивления бетонной смеси, действующего на торцевую стенку формы, увеличиваются с увеличением толщины уплотняемого слоя. Это объясняется тем, что с увеличением толщины уплотняемого слоя на их величину оказывают меньшее влияние значения растягивающих напряжений σ_0 . Наиболее сильное влияние на значение коэффициентов упругого c и неупругого b сопротивле-

ний оказывают растягивающие напряжения σ_0 при толщине уплотняемого слоя 20 см. Коэффициенты приведенной (присоединенной) массы при горизонтальных колебаниях и толщинах уплотняемого слоя 40–80 см изменяются в пределах $K_{pr}=0,25–0,42$.

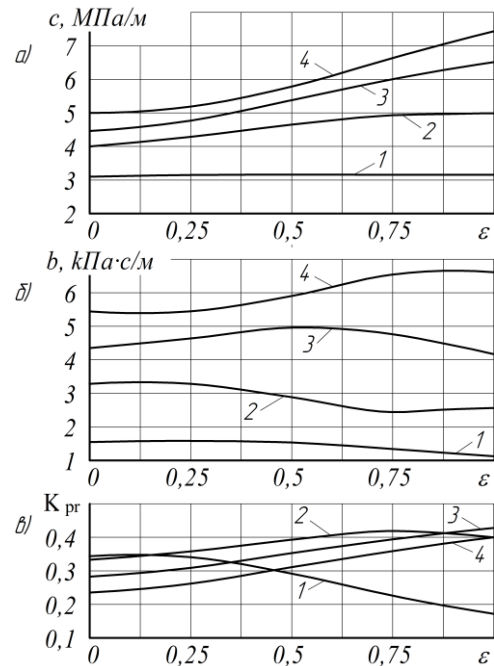


Рисунок 3 – Изменение коэффициентов упругого (а) и неупругого (б) сопротивления, а также коэффициента приведенной массы (в) бетонной смеси жесткостью $J=30$ с в зависимости от относительной плотности смеси ε : 1 – при толщине уплотняемого слоя $L=20$ см; 2 – при $L=40$ см; 3 – при $L=60$ см; 4 – при $L=80$ см

На рис. 4 показано изменение амплитуды колебаний виброформы в зависимости от относительной плотности смеси ε при уплотнения бетонной смеси с осадкой конуса ОК=3,5–4 см (а) и жесткостью $J=30$ с (б) при толщинах уплотняемого слоя от 20 до 80 см. Анализ приведенных зависимостей показывает, что амплитуда колебаний вибрационной формы уменьшается с увеличением толщины уплотняемого слоя L и возрастанием относительной плотности бетонной смеси. Приведенные теоретические зависимости хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Таким образом, на основе изучения распространения волн деформации в уплотняемой среде, представленной в виде системы с распределенными параметрами, получены зависимости для определения физико-механических характеристик уплотняемой среды, взаимодействующей с вертикальными стенками формы. Эти зависимости с достаточно высокой степенью точности могут быть использованы в сложных дискретных динамических системах, например, таких как предлагаемый вибрационный рабочий орган для уплотнения бетонных и тому подобных смесей.

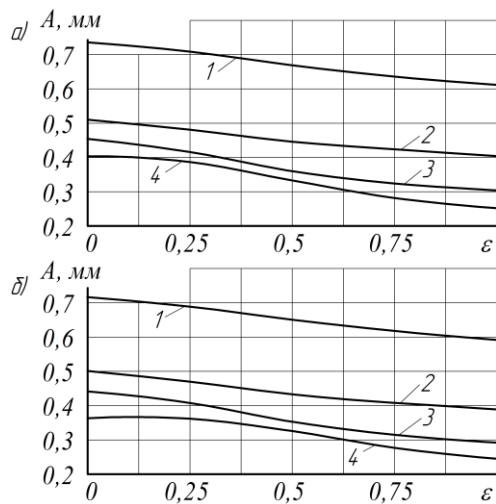


Рисунок 4 – Изменение амплитуды колебаний виброформы в зависимости от относительной плотности смеси ε при уплотнения бетонной смеси с осадкой конуса ОК=3,5 – 4 см (а) и жесткостью $J=30$ с (б): 1 – при толщине уплотняемого слоя $L = 20$ см; 2 – при $L = 40$ см; 3 – при $L = 60$ см; 4 – при $L = 80$ см

ВЫВОДЫ. На основании волновой теории колебаний изучен процесс распространения волн деформации в уплотняемой среде, представленной в виде системы с распределенными параметрами, и определен закон деформирования уплотняемой среды при воздействии на неё горизонтально направленными колебаниями со стороны вертикальных стенок вибраторной формы. Получены теоретические выражения, позволяющие достаточно точно описать поведение реальной динамической системы «Вибраторная форма – уплотняемая среда» при формовании бетонных изделий из жестких и пластичных цементобетонных смесей путем приложения горизонтально направленных колебаний. Они позволяют произвести компьютерное моделирование законов движения и форм колебаний уплотняемого слоя бетонной смеси, проанализировать их с точки зрения эффективного воздействия на обрабатываемую среду горизонтально направленными колебаниями, обосновать вид и форму вибраторного воздействия, а также обосновать рациональные параметры вибраторного оборудования. Полученные зависимости коэффициентов упругого и неупругого сопротивления, а также коэффициента приведенной массы бетонной смеси с достаточно высокой степенью

точности могут быть использованы в сложных дискретных динамических системах, например, таких как вибраторная форма без дна, совершающая сложные колебания в виде прямолинейных и крутильных колебаний в горизонтальной плоскости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маслова Н.А. Исследование взаимодействия вибраторного рабочего органа с уплотняемой средой // Сборник научных трудов Кременчугского государственного политехнического института «Проблемы создания новых машин и технологий». – 1997. – Вып. 2, часть III. – С. 32–44.
2. Маслов А.Г., Саленко Ю.С. Вибраторные машины и процессы в дорожно-строительном производстве. – Кременчук: ПП Щербатых О.В. – 2014. – 262 с.
3. Иванов Р.А., Федулов А.И. Ударные устройства для уплотнения грунта // Строительные и дорожные машины. – 2000. – № 2. – С. 27–29.
4. Пермяков В.Б., Беляев К.В. Математическая модель процесса уплотнения асфальтобетонных смесей // Известия вузов. Строительство. – Новосибирск: НГАСУ. – 2005. – Вып. 1. – С. 110–116.
5. Babitsky V.I., Krupenin V.L. Vibration of Strongly Nonlinear Discontinuous Systems.-Berlin. Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2001. – 404 p.
6. Иткин А.Ф. Вибраторные машины для формования бетонных изделий. – К.: «МП Леся». – 2009. – 152 с.
7. Маслов А.Г., Жанар Батсайхан. Исследование колебаний рабочего органа машины для уплотнения бетонных смесей в вибраторном рабочем режиме // Вісник Кременчугського національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ. – 2015. – Вип. 2 (91). Част. 1. – С. 92–97.
8. Karnovsky I.A. Theory of Arched Structures: Strength, Stability, Vibration // New York: Springer, 2012. – 456 p.
9. Маслов А.Г., Саленко Ю.С., Маслова Н.А. Исследование взаимодействия вибрирующей плиты с цементобетонной смесью // Вісник Кременчугського національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ. – 2011. – Вип. 2 (67). Част. 1. – С. 93–98.
10. Маслов А.Г. Иткин А.Ф., Саленко Ю.С. Вибраторные машины для приготовления и уплотнения бетонных смесей. – Кременчук: ЧП Щербатых А.В. – 2014. – 324 с.

INVESTIGATION OF THE INTERACTION OF CONCRETE MIX WITH VERTICAL WALLS OF THE VIBRATORIAL FORM

A. Maslov, V. Lukyanenko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: kmto@mail.ru

Purpose. Physico-mechanical properties of the sealing medium largely determine the behavior of the dynamic system of the vibration machine and have a significant impact on the definition of its main parameters. A fairly accurate determination of elastic, dissipative and inertial forces acting on the vertical wall of the vibration of the form side of the moldable mixture under horizontal oscillation, to determine the stable operating vibration machines, to choose technological parameters of the vibration influence on the processed medium, which provides an effective seal with low power consumption. When examining the interaction between vertical walls of the mold with the concrete mixture

during fluctuations in the horizontal direction it is necessary to consider the difference of loading on the sealing layer when the compression and tension that occurs in the concrete layer at the opposite vertical walls of the mold for each cycle of oscillation. Therefore, to justify the rational parameters of vibratory machines it is necessary to accurately determine the pattern of deformation generated environment vertical walls of the mold and set the law of motion of vibrating the forms used for the manufacture of building blocks. The aim of this work is to study the interaction of concrete mix with the vertical walls of the mold without a bottom horizontally directed oscillations. **Methodology.** In the study we described calculation scheme of dynamic system "a form of Vibration – compacted environment" consisting of a vibrating shape without a bottom, which is installed on a rigid base and filled with concrete mix. The front vertical mould wall acts horizontally directed harmonic power, which seals the mixture. The movement of the sealing mixture in the horizontal direction is described by the wave equation of oscillations, for the solution of which boundary conditions was used. The solution of the wave equation vibrations was obtained in the form of complex functions. These functions are then converted into real-valued function describing the wave propagation of deformations across the thickness of the compacted layer. **Results.** As a result of solving the wave equation of oscillations we determined the pattern of propagation of stress waves in compacted layer. It were obtained theoretical expressions, allowing to establish the laws of deformation of the compacted layer of concrete and a vibratory motion forms depending on the frequency and amplitude of the disturbing force, the mass of the vibration forms, the compacted layer thickness, consistency and density of the concrete mix. These dependencies sufficiently accurately describe the behavior of a real dynamical system "form of Vibratory – compacted environment" under horizontal excitation. They allow computer simulation of the laws of motion and vibration modes with compactable concrete layer, to analyze them from the point of view of effective influence on the processed medium, to justify the type and form of vibration exposure, and to clarify the rational parameters of a vibrating equipment. **Originality.** The obtained theoretical expressions allows to determine the elastic, dissipative and inertial resistance forces the concrete mix during vibration compaction. These expressions accurately describe the interaction of the vertical walls of the mold with compacted concrete and can be used in complex discrete dynamical systems. **Practical value.** The proposed method of compaction will be used on vibrating machines, used for making concrete blocks, as well as on independent vibration machines for molding concrete blocks rigid concrete mixes. References 10, tables 01, figures 4.

Key words: vibration form, vibration, law of motion, the sealing medium.

REFERENCES

- Maslova, N.A. (1997), "Investigation of the interaction of the vibration of the working body with sealing medium", *Problems of creation of new machines and technologies. Scientific works of Kremenchug State Polytechnic institute*, no. 2, vol. 3, pp. 32–44.
- Maslov, A.G., Salenko, Y.S. (2014), *Vibratsionnyie mashinyi i protsessy v dorozhno-stroitelnom proizvodstve: monographiya* [Vibrating machines and processes in road construction industry: monograph], PP Cherbatykh, Kremenchuk, Ukraine.
- Ivanov, R.A. (2000), "Impact device for compacting soil", *Construction and road machines*, no 2, pp. 27–29.
- Permiakov, V.B. Belyaev, K.V. (2005), "A mathematical model of the process of sealing asphalt mixes", *Proceedings of the universities. Building. Novosibirsk: NSABU*, no. 1, pp. 110–116.
- Babitsky, V.I., Krupenin, V.L. (2001), *Vibration of Strongly Nonlinear Discontinuous Systems*, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, USA.
- Itkin, A.F. (2009), *Vybratsyonnyie mashyny dlya formovanyia betonnykh izdeliy* [Vibrating machines forming of the concrete products], "Les MP", Kyiv, Ukraine.
- Maslov, A.G. Batsaikhan, Z. (2015), "The Research of oscillations of the machine working body of the for compaction of concrete mixes in vibration working mode", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. Kremenchug: KRNU*, Iss. (91), pp. 92–97.
- Karnovsky, I.A. (2012) *Theory of Arched Structures: Strength, Stability, Vibration*, Springer, New York, USA.
- Maslov, A.G., Salenko, Y.S. Maslova, N.A. (2011), "Study of the interaction between a vibrating plate with cement concrete mixture", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, Iss. (67), pp. 93–98.
- Maslov, A.G., Itkin, A.F, Salenko, Y.S. (2014), *Vibratsionnyie mashyny dlya prigotovleniya i uplotneniya betonnykh smesey* [Vibrating machines for the preparation and compaction of concrete mixes], PP Cherbatykh, Kremenchuk, Ukraine.

Стаття надійшла 20.12.2015.