

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИОННОЙ ФОРМЫ С БЕТОННОЙ СМЕСЬЮ ПРИ РАЗНОНАПРАВЛЕННЫХ КОЛЕБАНИЯХ

**А. Г. Маслов, Л. Н. Ахметова, А. И. Елизаров**

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

Составлены математические модели взаимодействия бетонной смеси с днищем вибрационной формы при вертикальных и горизонтальных колебаниях, а также с вертикальными стенками вибрационной формы при горизонтально направленных колебаниях. Уплотняемая среда представлена в виде сплошной среды с распределенными параметрами. В результате решений уравнений колебаний уплотняемой среды в частных производных, удовлетворяющего заданным граничным условиям при разнонаправленных колебаниях, определена закономерность деформирования уплотняемой среды 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 приведенные массы и коэффициент сопротивления бетонной смеси при разнонаправленных колебаниях, действующих на днище и вертикальные стенки вибрационной формы. Определены амплитуды колебаний вибрационной формы и напряжения, возникающие в уплотняемой среде.

**Ключевые слова:** вибрационная форма, колебания, взаимодействие, уплотняемая среда.

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ ВІБРАЦІЙНОЇ ФОРМИ З БЕТОННОЮ СУМІШСЮ ПРИ РІЗНОСПРЯМОВАНИХ КОЛИВАННЯХ

**О. Г. Маслов, Л. М. Ахметова, О. І. Єлізаров**

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

Складено математичні моделі взаємодії бетонної суміші з днищем вібраційної форми при вертикальних і горизонтальних коливаннях, а також з вертикальними стінками вібраційної форми при горизонтально направлених коливаннях. Ущільнюване середовище представлено у вигляді суцільного середовища з розподіленими параметрами. В результаті рішень рівнянь коливань ущільнюваного середовища в частинних похідних, що задовольняють заданим граничним умовам при різноспрямованих коливаннях, визначена закономірність деформування ущільнюваного середовища залежно від наростаючої у часі щільності формируемой суміші, її фізико-механічних характеристик, товщини ущільнюваного шару, маси вібраційної форми, частоти і амплітуди вимушеної сили. Визначено наведені маси і коефіцієнт опору бетонної суміші при різноспрямованих коливаннях, що діють на днище і вертикальні стінки вібраційної форми. Визначено амплітуди коливань вібраційної форми і напруги, що виникають в ущільнюваному середовищі.

**Ключові слова:** вібраційна форма, коливання, взаємодія, ущільнюване середовище.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** На характер колебаний вибрационной формы и эффективность обработки цементобетонных смесей большое влияние оказывают физико-механические характеристики обрабатываемой среды [1, 2, 3]. В практике создания вибрационных машин их движение и определение основных параметров производят при рассмотрении только вертикальных [4, 5, 6] либо горизонтальных [7, 8, 9] колебаний. При этом не учитывается вибрационное воздействие на бетонную среду, осуществляемое в другой плоскости. Правильный учет сил сопротивления цементобетонной смеси во многом определяет точность установления закона колебаний вибрационной формы, выбора её рациональных параметров и технологических параметров вибрационного воздействия на обрабатываемую среду. Эти силы сопротивления возникают при вертикальных, горизонтальных и крутильных (угловых) колебаниях вибрационной формы, осуществляемые одновременно, и имеют при этом различные значения. Поэтому для обоснования рациональных параметров вибрационной формы необходимо точно определить закономерность деформирования формируемой среды в вертикальном и горизонтальном направлениях, а также деформирование бетонной среды боковыми стенками формы.

Цель работы – исследование взаимодействия бетонной смеси с днищем и вертикальными стенками вибрационной формы при разнонаправленных колебаниях.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Для определения характера взаимодействия вибрационной формы с обрабатываемой цементобетонной средой в вертикальном направлении исследуем динамическую систему «вибрационная форма - цементобетонная среда» (рис. 1). Здесь вибрационная форма конструктивно выполнена с плоским днищем, а обрабатываемая среда представлена в виде системы с распределенными параметрами. Вибрационная форма установлена на основании при помощи упругих амортизаторов и на неё действует возмущение в виде вертикально направленной гармонической силы  $Q \sin \omega t$ .

Зависимость между напряжением и деформацией обрабатываемой цементобетонной среды может быть в первом приближении описана известным уравнением

$$\sigma = E \frac{\partial u(z, t)}{\partial z}, \quad (1)$$

где  $u$  и  $z$  – эйлерова и лагранжева координаты;  $E$  – динамический модуль упругой деформации обрабатываемой цементобетонной смеси.

Дифференциальное уравнение движения уплотняемой смеси в направлении координаты  $z$  за время  $t$  будет иметь вид [10]

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

или с учетом зависимости (1) –

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

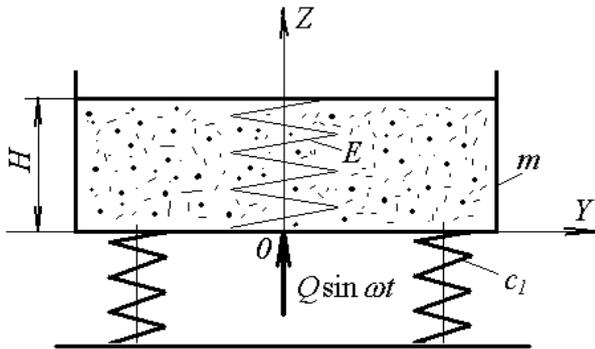


Рисунок 1 – Расчетная схема динамической системы «вибрационная форма - цементобетонная среда» при вертикально направленных колебаниях

Решение волнового уравнения колебаний (3) будем отыскивать при следующих граничных условиях

$$-m \frac{\partial^2 u(0, t)}{\partial t^2} - c_1 u(0, t) + EF \frac{\partial u(0, t)}{\partial z} = -Q \sin \omega t; \quad (4)$$

$$E \frac{\partial u(H, t)}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

где  $m$  – масса вибрационной формы;  $c_1$  – коэффициент жесткости упругих амортизаторов в вертикальном направлении;  $Q$  – амплитуда возмущающей силы;  $\omega$  – угловая частота вынужденных колебаний;  $F$  – площадь дна вибрационной формы с бетонной смесью;  $H$  – высота обрабатываемого слоя смеси.

Для решения уравнения (3) представим функцию  $u(z, t)$  в виде [2]

$$u(z, t) = u(z) \sin \omega t. \quad (6)$$

Подставляя выражение (6) в уравнение (3) получим уравнение

$$\frac{\partial^2 u(z)}{\partial z^2} + k^2 u(z) = 0, \quad (7)$$

где  $k$  – волновое число,  $k = \frac{\omega}{a}$ ;  $a$  – фазовая скорость распространения возмущения в обрабатываемом слое;

$$a = \sqrt{E/\rho}. \quad (8)$$

Поставляя решение уравнения (7) в выражение (6), получим зависимость для определения функции  $u(z, t)$ , т.е.

$$u(z, t) = (A \sin kz + B \cos kz) \sin \omega t. \quad (9)$$

Здесь  $A$  и  $B$  – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий (4) и (5).

Подставляя последовательно выражение (9) в граничные условия (5) и (4), найдем постоянные интегрирования  $A$  и  $B$

$$B = \frac{Q}{c_1 - (m + \frac{\rho F}{k} \operatorname{tg} kH) \omega^2}; \quad (10)$$

$$A = \frac{Q}{c_1 - (m + \frac{\rho F}{k} \operatorname{tg} kH) \omega^2} \cdot \frac{\sin kH}{\cos kH}. \quad (11)$$

Подставляя выражения (10) и (11) в зависимость (9), найдем искомое решение уравнения (3), в следующем виде

$$u(z, t) = \frac{Q}{c_1 - (m + \frac{\rho F}{k} \operatorname{tg} kH) \omega^2} \times \frac{\cos k(H-z)}{\cos kH} \sin \omega t. \quad (12)$$

Из анализа полученного решения (12) уравнения (3) следует, что выражение  $(\frac{\rho F}{k} \operatorname{tg} kH) \omega^2$  представ-

ляет собой не что иное, как величину силы инерции цементобетонной смеси в вертикальном направлении. Отсюда следует, что приведенная масса цементобетонной смеси в вертикальном направлении  $m_{np1}$  может быть определена из следующего выражения

$$m_{np1} = \frac{\rho F}{k} \operatorname{tg} kH. \quad (13)$$

Величина удельной приведенной массы цементобетонной смеси в вертикальном направлении определится из выражения (13)

$$m_{y1} = m_{np1} / F = \frac{\rho}{k} \operatorname{tg} kH. \quad (14)$$

Значения  $m_{np1}$  существенно зависят от динамического модуля упругой деформации  $E$  обрабатываемой цементобетонной смеси, ее плотности  $\rho$ , фазовой скорости распространения возмущения в уплотняемом слое  $a$ , угловой частоты колебаний  $\omega$ , толщины обрабатываемого слоя  $H$ , и площади опорной поверхности дна формы  $F$ .

Цементобетонная смесь при сдвиговых деформациях, так же как и при нормальных деформациях, обладает инерционными свойствами. Однако при действии сдвиговых деформаций в бетонной смеси, возникающих в результате крутильных колебаний вибрационной формы, определение характеристик взаимодействия вибрационной формы с бетонной смесью при помощи волновой теории колебаний представляет собой довольно сложную задачу. Поэтому для определения сил сопротивления цементобетонной смеси при сдвиговых деформациях вос-

пользуемся косвенными методами. На рис. 2 представлена расчетная схема динамической системы «вибрационная форма - цементобетонная смесь», в которой выполненная с плоским дном вибрационная форма установлена на основании на упругих амортизаторах и на неё действует возмущение в виде горизонтально направленной гармонической силы  $Q \sin \omega t$ .

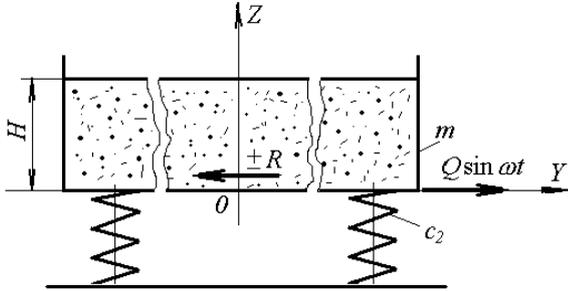


Рисунок 2 – Расчетная схема динамической системы «вибрационная форма - цементобетонная среда» при горизонтально направленных колебаниях

При колебаниях вибротка, на него со стороны цементобетонного слоя будет действовать сила кулонова трения

$$R = m_b g f = F H \rho g f, \quad (15)$$

где  $m_b$  - масса обрабатываемого слоя смеси.

На основании выражения (15), движение вибрационной формы в горизонтальном направлении может быть описано следующим нелинейным уравнением:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c_2 y + f(t) = Q \sin \omega t, \quad (16)$$

где  $y$  – перемещения вибрационной формы в горизонтальном направлении;  $c_2$  – коэффициент жесткости упругих амортизаторов в горизонтальном направлении;  $f(t)$  – нелинейная функция:

$$f(t) = \pm R. \quad (17)$$

Можно предположить, что вибрационная форма под действием гармонической силы  $Q \sin \omega t$  будет совершать периодические колебания с частотой  $\omega$ . Тогда при стационарных колебаниях вибрационной формы нелинейную функцию  $f(t)$  с достаточной степенью точности можно представить в виде ряда Фурье [10]:

$$f(t) = \frac{4R}{\pi} \times \left\{ \sin \omega t + \frac{\sin 3\omega t}{3} + \frac{\sin 5\omega t}{5} + \dots + \frac{\sin [(2n+1)t]}{2n+1} \right\}. \quad (18)$$

Подставляя функцию (18) в уравнение (16) и ограничиваясь тремя членами разложения ряда, получим следующее уравнение колебаний:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c_2 y + f(t) = Q \sin \omega t - \frac{4R}{\pi} \left( \sin \omega t + \frac{\sin 3\omega t}{3} + \frac{\sin 5\omega t}{5} \right). \quad (19)$$

Решение уравнения (19) для стационарных колебаний будет иметь следующий вид:

$$y(t) = (A - A_1) \sin \omega t - A_2 \sin 3\omega t - A_3 \sin 5\omega t, \quad (20)$$

где  $A, A_1, A_2, A_3$  – амплитуды колебаний на соответствующей гармонике;

$$A = \frac{Q}{c_2 - m\omega^2}; \quad (21)$$

$$A_1 = \frac{4R}{\pi(c_2 - m\omega^2)}; \quad (22)$$

$$A_2 = \frac{4R}{\pi(c_2 - 9m\omega^2)}; \quad (23)$$

$$A_3 = \frac{4R}{\pi(c_2 - 25m\omega^2)}. \quad (24)$$

Анализ полученных выражений (20–24) показывает, что в динамической системе «вибрационная форма – цементобетонная смесь» обрабатываемая среда при горизонтально направленных колебаниях играет роль отрицательного возмущающего сопротивления.

Используя метод линеаризации силы кулонового трения [2], приведем уравнение (16) к следующему виду

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + b_e \frac{dy}{dt} + c_2 y = Q \sin \omega t, \quad (25)$$

где  $b_e$  – эквивалентный коэффициент вязкого трения бетонной смеси в горизонтальном направлении;

$$b_e = \frac{4R}{\pi A_e \omega} = \frac{4m_b g f}{\pi A_e \omega}; \quad (26)$$

$A_e$  – амплитуда колебаний вибрационной формы с учетом действия эквивалентного трения бетонной смеси.

При этом решение уравнения (25) для стационарных колебаний будет иметь следующий вид

$$y(t) = A_e \sin(\omega t - \varphi_e), \quad (27)$$

где  $\varphi_e$  – угол сдвига фаз между перемещением и амплитудой возмущающих сил;

$$A_e = \frac{Q}{\sqrt{(c_2 - m\omega^2)^2 + b_e^2 \omega^2}}; \quad (28)$$

$$\varphi_e = \arctg \frac{b_e \omega}{c_2 - m\omega^2}. \quad (29)$$

Подставляя зависимость (26) в выражение (28), найдем окончательно амплитуду колебаний вибротка с учетом значений эквивалентного коэффициента вязкого трения бетонной смеси  $b_e$ , т.е.

$$A_e = \sqrt{Q^2 - \frac{16R^2}{\pi^2}} / (c_2 - m\omega^2). \quad (30)$$

Анализ полученных выражений (20) и (27) и сравнение их с экспериментальными данными показывают, что описание закона движения динамической системы с кулоновым трением можно доста-

точно точно произвести с помощью выражения (20), а с помощью выражения (27) можно достаточно точно определить только амплитуду колебаний.

Таким образом, найденные коэффициенты сопротивления при сдвиговых деформациях и приведенная масса  $m_{np1}$  цементобетонной смеси при нормальных возмущениях, позволяют достаточно точно учесть влияние физико-механических характеристик цементобетонной смеси на поведение вибрационной формы и значительно упростить его расчетную схему при действии крутильных колебаний.

Для определения характера взаимодействия противоположными вертикальными стенками вибрационной формы, а с обрабатываемой цементобетонной средой при действии нормальных горизонтально направленных колебаний исследуем динамическую систему «вибрационная форма - цементобетонная среда» (рис. 3). Здесь вибрационная форма конструктивно выполнена с плоским дном, а обрабатываемая среда представлена в виде системы с распределенными параметрами. Вибрационная форма смонтирована на основании с помощью упругих амортизаторов и на неё действует возмущение в виде горизонтально направленной гармонической силы  $Q \sin \omega t$ .

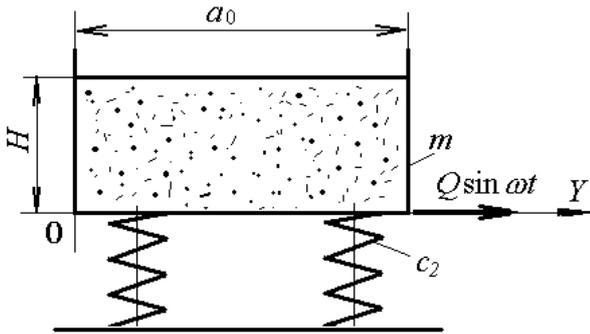


Рисунок 3 – Расчетная схема для исследования взаимодействия вертикальных стенок вибрационной формы с цементобетонной смесью при горизонтально направленных колебаниях

При изучении взаимодействия цементобетонной смеси с вертикальными стенками вибрационной формы условно не будем учитывать действие сил трения бетонной смеси о дноце вибрационной формы. Тогда дифференциальное уравнение движения уплотняемой смеси в направлении координаты  $y$  за время  $t$  будет иметь вид [10]:

$$E \frac{\partial^2 u(y,t)}{\partial y^2} = \rho \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial t^2} . \quad (31)$$

Решение волнового уравнения колебаний (31) будем отыскивать при следующих граничных условиях:

$$-m \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial t^2} - c_2 u(0,t) + EF_1 \frac{\partial u(0,t)}{\partial y} = -Q \sin \omega t ; \quad (32)$$

$$u(0,t) = u(a_0,t) . \quad (33)$$

Здесь  $F_1$  – площадь поверхности одной вертикальной стенки, контактирующей с цементобетонной смесью;  $a_0$  – расстояние между вертикальными стенками (ширина обрабатываемого слоя).

Остальные обозначения приведены выше.

Для решения уравнения (31) представим функцию  $u(y,t)$  в виде [2]

$$u(y,t) = u(y) \sin \omega t . \quad (34)$$

Подставляя выражение (34) в уравнение (31) получим уравнение

$$\frac{\partial^2 u(y)}{\partial y^2} + k^2 u(y) = 0 . \quad (35)$$

Поставляя решение уравнения (35) в выражение (34), получим зависимость для определения функции  $u(y,t)$ , т.е.

$$u(y,t) = (A \sin ky + B \cos ky) \sin \omega t . \quad (36)$$

Здесь  $A$  и  $B$  - постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий (32) и (33);

Подставляя последовательно выражение (36) в граничные условия (32) и (33), найдем постоянные интегрирования  $A$  и  $B$ :

$$A = \frac{Q - Q \cos ka_0}{(c_2 - m\omega^2) \sin ka_0 - kEF_1(1 - \cos ka_0)} ; \quad (37)$$

$$B = \frac{Q}{c_2 - \omega^2} + \frac{kF_1 E}{c_2 - \omega^2} \times \frac{Q - Q \cos ka_0}{(c_2 - m\omega^2) \sin ka_0 - kEF_1(1 - \cos ka_0)} . \quad (38)$$

Подставляя выражения (37) и (38) в зависимость (36), найдем искомое решение уравнения (31) в следующем виде:

$$u(y,t) = \frac{Q \left( \frac{1 - \cos ka_0}{\sin ka_0} \sin ky + \cos ky \right)}{c_2 - \left[ m + \frac{\rho F_1 (1 - \cos ka_0)}{k \sin ka_0} \right] \omega^2} \sin \omega t . \quad (39)$$

Из анализа полученного решения (39) уравнения (31) следует, что выражение  $\left[ \frac{\rho F_1 (1 - \cos ka_0)}{k \sin ka_0} \right] \omega^2$

представляет собой не что иное, как величину силы инерции цементобетонной смеси, взаимодействующей с вертикальными стенками вибрационной формы при горизонтально направленных колебаниях. Отсюда следует, что цементобетонную смесь, взаимодействующую с вертикальными стенками вибрационной формы при горизонтально направленных колебаниях, можно представить в виде приведенной массы  $m_{np2}$ , т.е.

$$m_{np2} = \frac{\rho F_1 (1 - \cos ka_0)}{k \sin ka_0} . \quad (40)$$

В рассматриваемой динамической системе при горизонтально направленных колебаниях также будут действовать силы трения бетонного столба о дноце вибрационной формы, которые можно учесть с помощью эквивалентного коэффициента сопротивления  $b_e$  бетонной смеси (26). Тогда с учетом

выражений (27), (29) и (30) зависимость (27) преобразуется к следующему виду:

$$u(y, t) = \frac{\sqrt{Q^2 - \frac{16R^2}{\pi^2}}}{c_2 - (m + m_{np2})\omega^2} \times \left( \frac{1 - \cos ka_0}{\sin ka_0} \sin ky + \cos ky \right) \sin(\omega t - \varphi_e). \quad (41)$$

Величина удельной приведенной массы цементобетонной смеси в вертикальном направлении определится из выражения (40)

$$m_{y2} = \frac{m_{np2}}{F_1} = \frac{\rho(1 - \cos ka_0)}{k \sin ka_0}. \quad (42)$$

Значения  $m_{np2}$  существенно зависят от динамического модуля упругой деформации  $E$  обрабатываемой цементобетонной смеси, ее плотности  $\rho$ , фазовой скорости распространения возмущения в уплотняемом слое  $a$ , угловой частоты колебаний  $\omega$ , ширины обрабатываемого слоя  $a_0$ , и площади поверхности одной из вертикальных стенок  $F_1$ .

**ВЫВОДЫ.** На основании теории колебаний механики сплошной среды изучен процесс распространения волн деформации в уплотняемой среде, представленной в виде системы с распределенными параметрами, и определен закон деформирования уплотняемой среды при разнонаправленных колебаниях, действующих на днище вибрационной формы в вертикальном и горизонтальном направлениях, а также на вертикальные стенки вибрационной формы при горизонтально направленных колебаниях. Воздействию на неё горизонтально направленными колебаниями со стороны вертикальных, близко расположенных друг к другу стенок вибрационной формы. Получены теоретические выражения, позволяющие достаточно точно описать поведение реальной динамической системы «Вибрационная форма – уплотняемая среда» при формовании бетонных изделий из бетонных смесей путем приложения разнонаправленных колебаний.

Они позволяют произвести компьютерное моделирование законов движения и форм колебаний уплотняемых слоев бетонной смеси, проанализировать их с точки зрения эффективного воздействия на обрабатываемую среду разнонаправленными колеба-

ниями, обосновать вид и форму вибрационного воздействия, а также обосновать рациональные параметры вибрационного оборудования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Маслов А.Г., Саленко Ю.С., Маслова Н.А. Исследование взаимодействия вибрирующей плиты с цементобетонной смесью // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, вип. 2 (67). Частина 1. – Кременчук: КрНУ, 2011. – С 93–98.
2. Маслов А.Г., Саленко Ю.С. Вибрационные машины и процессы в дорожно-строительном производстве. – Кременчук: ИП Щербатых О.В. – 2014. – 262 с.
3. Иткин А.Ф. Вибрационные машины для формования бетонных изделий. – К.: «МП Леся». – 2009. – 152 с.
4. Chen X., Wu S., Zhou J. (2013), “Experimental study and analytical formulation of mechanical behavior of concrete”, *Construction and Buildings Materials* 47, pp. 662–670.
5. Tattersall G. H. (1990), “Effect of Vibration on the Rheological Properties of Fresh Cement Pastes and Concretes”, *Rheology of Fresh Cement and Concrete, Proceedings of the International Conference, P. F. G. Banfill, ed., University of Liverpool, UK, Mar. 16-29, Chapman and Hall, London*, pp. 323-338.
6. Kakuta S., Kojima T. (1990), “Rheology of Fresh Concrete under Vibration”, *Rheology of Fresh Cement and Concrete, Proceedings of the International Conference, P. F. G. Banfill, ed., University of Liverpool, UK, Mar.*
7. Szwabowski J. (1990), Influence of Three-Phase Structure on the Yield Stress of Fresh Concrete, *Rheology of Fresh Cement and Concrete, Proceedings of the International Conference, P. F. G. Banfill, ed., University of Liverpool, UK, Mar. 16-29, 1990, Chapman and Hall, London*, pp. 241-248.
8. Kłosiński J., Trąbka A. (2010), Frequency analysis of vibratory device model (in Polish). *Pneumatyka*, 1, pp. 46-49.
9. Żółtowski B. (2002), Research of machine dynamics (in Polish), *Wyd. MARKAR, Bydgoszcz*.
10. Маслов А.Г., Иткин А.Ф., Саленко Ю.С. Вибрационные машины для приготовления и уплотнения бетонных смесей. – Кременчук: ЧП Щербатых А.В. – 2014. – 324 с.

#### STUDY OF THE INTERACTION BETWEEN VIBRATING FORM AND CONCRETE MIXTURE WITH DIFFERENTLY DIRECTED OSCILLATIONS

A. Maslov, L. Akhmetova, A. Elisarov

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: kmto@mail.ru

**Purpose.** To study the interaction of concrete mix with bottom and vertical walls vibrating shapes with differently directed oscillations. The correct account of the forces of resistance of cement concrete mix largely determines the accuracy of the establishment of the law of vibrations of the vibration forms, the choice of her rational parameters and technological parameters of vibration exposure on the treated environment. These resistance forces arise in the vertical, horizontal and torsional (angular) vibrations vibrating forms performed simultaneously, and have different values. Therefore, for justification of rational parameters of vibrating the forms necessary to accurately determine the pattern of deformation generated environment in vertical and horizontal directions, and the deformation of the concrete environment of the side walls of the mold. **Methodology.** Mathematical model of interaction of concrete mix with bottom vi-

brating the forms with vertical and horizontal vibrations, vertical wall of the vibration shape at the horizontally directed oscillations. Here the sealing environment is presented in the form of continua with distributed parameters. As a result of solutions to the equations of oscillations of the sealing medium equations, satisfying the given boundary conditions with differently directed oscillations, determined the pattern of deformation of the sealing medium depending on the rise time of the density of the moldable mixture, its physical-mechanical characteristics, the thickness of the sealing layer of the vibrating mass shape, frequency and amplitude of disturbing force. **Results.** On the basis of oscillation theory to continuum mechanics, studied the process of propagation of waves of deformation in the sealing environment, presented in the form of systems with distributed parameters, and defined the law of deformation of the sealing medium with multidirectional vibrations acting on the bottom of the vibrating shape in the vertical and horizontal directions and the vertical wall of the vibration shape at the horizontally directed oscillations. subjected to horizontally directed vibrations from the vertical, closely spaced to each other walls of the vibration shape. The theoretical expression that allows to accurately describe the behavior of a real dynamical system "form of Vibratory – compacted environment" in the molding of concrete products from ready mix concrete by the application of multidirectional vibrations. **Originality.** The obtained theoretical expressions allow computer simulation of the laws of motion and mode shapes of the sealing layers of the concrete mix, to analyze them from the point of view of effective influence on the processed medium multidirectional vibrations, to justify the shape and form of vibration exposure, and to substantiate the rational parameters of vibrating equipment. **Practical value.** The proposed method of determining the laws of motion and basic parameters of vibration forms for compaction of concrete mixtures will be widely used in the design of new vibrating machines for compacting concrete mixes. References 10, tables 0, figures 3.

**Key words:** form vibration, oscillation, interaction, the sealing environment.

#### REFERENCES

- 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. Kremenchuk*: KRNU, Issue (67), pp. 93 – 98.
- Maslov, A.G., Salenko, Y.S. (2014), *Vibratsionnyie mashiny i protsessyi v dorozhno-stroitelnom proizvodstve* [Vibrating machines and processes in road construction industry: monography], PP Cherbatykh, Kremenchuk, Ukraine.
- Itkin, A.F. (2009), *Vybratsyonnie mashyny dlya formovaniya betonnykh izdeliy* [Vibrating machines forming of the concrete products], "Les MP", Kyiv, Ukraine.
- Chen, X., Wu, S., Zhou, J. (2013), "Experimental study and analytical formulation of mechanical behavior of concrete", *Construction and Buildings Materials* 47, pp. 662–670.
- Tattersall, G.H. (1990), "Effect of Vibration on the Rheological Properties of Fresh Cement Pastes and Concretes", *Rheology of Fresh Cement and Concrete, Proceedings of the International Conference, P. F. G. Banfill, ed., University of Liverpool, UK, Mar. 16-29, 1990, Chapman and Hall, London*, pp. 241-248.
- Kłosiński, J., Trąbka, A. (2010), Frequency analysis of vibratory device model (in Polish). *Pneumatyka*, 1, pp. 46-49.
- Żółtowski, B. (2002), Research of machine dynamics (in Polish), *Wyd. MARKAR, Bydgoszcz*
- Maslov, A.G., Itkin, A.F., Salenko, Y.S. (2014), *Vibratsionnyie mashiny dlya prigotovleniya i uplotneniya betonnykh smesey* [Vibrating machines for the preparation and compaction of concrete mixes], PP Cherbatykh, Kremenchuk, Ukraine.

Стаття надійшла 18.12.2017.