

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛОСКОСТНОГО ГЛУБИННОГО ВИБРОУПЛОТНИТЕЛЯ С БЕТОННОЙ СМЕСЬЮ

**А. Г. Маслов, Жанар Батсайхан**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, м. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: kmt0.43@gmail.com

На основе анализа существующих конструкций и способов глубинного уплотнения бетонных смесей предложен глубинный уплотнитель в виде плоской вертикальной плиты, в верхней части которой смонтирован вибровозбудитель горизонтальных колебаний. Для определения характера взаимодействия вибрационного глубинного уплотнителя с бетонной смесью была исследована динамическая система «виброуплотнитель – бетонная среда», в которой последняя представлена в виде системы с распределенными параметрами, учитывающей упругие, вязкие, инерционные и энергетические свойства уплотняемой 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 смеси, представленной в виде полупространства. В результате решения волнового уравнения колебаний установлена закономерность распространения вязко-упруго-пластических волн деформаций в полупространстве уплотняемой бетонной смеси в комплексной форме.

**Ключевые слова:** глубинный виброуплотнитель, бетонная смесь, взаимодействие, волновое уравнение.

### ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ ПЛОЩИННОГО ГЛУБИННОГО ВІБРОУЩІЛЬНЮВАЧА З БЕТОННОЮ СУМІШШЮ

**О. Г. Маслов, Жанар Батсайхан**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: kmt0.43@gmail.com

Описано перевага глибинного ущільнення бетонної суміші. На основі аналізу існуючих конструкцій і способів глибинного ущільнення бетонних сумішей запропоновано глибинний ущільнювач у вигляді плоскої вертикальної плити, у верхній частині якої змонтовано вібровозбудувач горизонтальних коливань. Для визначення характеру взаємодії вібраційного глибинного ущільнювача з бетонною сумішшю була досліджена динамічна система «віброущільнювач – бетонне середовище», в якій останнє представлено у вигляді системи з розподіленими параметрами, що враховує пружні, в'язкі, інерційні та енергетичні властивості ущільнюваної бетонної суміші. Складено рівняння в частинних похідних, що описує зміну напруги в ущільнюваному середовищі залежно від динамічного модуля пружної деформації, коефіцієнта динамічної в'язкості, коефіцієнта 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 ущільнюваному бетонному середовищі. Для вирішення хвильового рівняння коливань використовувалися крайові умови. Перша крайова умова описує силову взаємодію вертикальної плити з ущільнюваним бетонним середовищем при дії гармонічного збурення, представленого у вигляді уявної частини комплексної функції. Друга крайова умова описує поширення хвиль деформаций в півпросторі та показує, що поширення хвилі обурення нічим не обмежено і при відстані, яка дорівнює чверті довжині хвилі відносна деформація ущільнюваного середовища дорівнює нулю. Знайдено постійні інтегрування (комплексні функції), що задовольняють крайовим умовам. На підставі рішення хвильового рівняння коливань, що описує поширення хвиль деформаций у півпросторі, визначені: фазова швидкість поширення хвилі деформаций, хвильове число і коефіцієнт поглинання обурення в ущільнюваному середовищі. Встановлено закон поширення в'язко-пружно-пластичних хвиль деформаций в ущільнюваній бетонній суміші, представленій у вигляді півпростору, в комплексній формі. Отримані залежності дозволяють обґрунтувати раціональні параметри площинного глибинного ущільнювача і режими вібраційного впливу на ущільнюване середовище.

**Ключові слова:** глибинний віброущільнювач, бетонна суміш, взаємодія, хвильове рівняння.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Из всех способов уплотнения, внутреннее (глубинное) вибрирование бетонных смесей энергетически наиболее выгодно, так как вибрационный рабочий орган, погруженный в уплотняемую среду непосредственно передает ей вибрационное воздействие с минимальными энергетическими потерями. Для этих целей используют глубинные вибраторы [1] с диаметром булав (наконечника) от 36 до 76 мм. Для технологического оборудования используются навесные глубинные вибраторы с диаметром наконечника от 75 до 133 мм. Эти вибрационные машины обеспечивают проработку и

уплотнение бетонной смеси в радиусе от 200 до 300 мм в зависимости от диаметра наконечника и консистенции бетонной смеси. Для ускорения и комплексной механизации укладки и уплотнения бетонных смесей используют пакеты глубинных вибраторов с индивидуальными приводами для каждого, которые при помощи специальных подвесок смонтированы в виде рабочего оборудования на кранах или малогабаритных тракторах [2]. Эти конструкции имеют сложные устройства и могут быть использованы только для очень большого объема бетонирования.

Для увеличения активной зоны вибрирования был разработан плоскостной глубинный уплотнитель [3], выполненный в виде вертикальной плоской плиты, на которой смонтированы два глубинных вибратора с индивидуальным приводом каждого. Из-за большого веса этот глубинный уплотнитель не мог использоваться в строительном производстве в качестве ручного механизма. Не была исследована эффективность использования плоскостного глубинного вибратора и поэтому он не получил широкого применения.

Необходимо отметить, что при длительной работе глубинные уплотнители, снабженные планетарными вибраторами [4] быстро выходят из строя.

Для эффективной работы глубинного уплотнителя необходимо точно выбрать его основные параметры и режимы вибрационного воздействия на бетонную смесь, которую представляют реологической моделью в виде упругой модели Гука, вязкого тела Ньютона, упруго-вязко тела Кельвина – Фогта или Максвелла [5–9]. Наиболее точные результаты дает реологическая модель, которые учитывают упругие, инерционные, диссипативные силы и силы неупругого сопротивления, действующие со стороны бетонной смеси на уплотняющий вибрационный рабочий [10].

Цель работы – исследование взаимодействия плоскостного глубинного вибрационного уплотнителя с бетонной средой, представленной в виде полупространства.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** На сегодняшний день глубинные вибраторы представляет собой устройства, незаменимые при изготовлении конструкций из монолитного бетона, а также при изготовлении бетонных блоков. С целью снижения энергоемкости, упрощения конструкции и увеличения активной зоны вибрирования, нами был разработан глубинный уплотнитель с плоской вертикальной плитой, на которой смонтирован вибровозбудитель горизонтальных или крутильных колебаний.

Закономерность колебаний глубинного уплотнителя, используемого для уплотнения и обработки бетонных смесей, 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 вибрационного воздействия вибрационного уплотнителя в бетонной смеси возникают инерционные, упругие и неупругие силы сопротивления, которые существенно влияют 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 вибрационного глубинного уплотнителя с обрабатываемой средой создаются предпосылки для установления рациональных параметров вибрационной машины, обеспечивающих эффективное уплотнение и обработку бетонных смесей с малой энергоемкостью и высокой производительностью.

Для определения характера взаимодействия вибрационного глубинного уплотнителя с бетонной смесью исследуем динамическую систему, представленную на рис.1. Здесь вибрационный глубинный уплотнитель состоит из плоской вертикальной плиты 1, в верхней части которой смонтирован вибровозбудитель колебаний 2. Вибрационный глубинный уплотнитель погружен в бетонную смесь 3, которая представлена в виде системы с распределенными параметрами. В рассматриваемой расчетной схеме принято допущение, что под действием вибрационного возбудителя колебаний 2 вертикальная плита 1 совершает только горизонтально направленные колебания перпендикулярные плоскости плиты 1. В этом случае под действием горизонтально направленной гармонической силы  $Q \sin \omega t$  глубинный виброуплотнитель колеблется в горизонтальном направлении и осуществляет вибрационное воздействие на уплотняемую смесь, под действием которого она переходит в тиксотропное состояние, из неё удаляется воздух и она уплотняется. Здесь  $Q$  – амплитуда горизонтальной возмущающей силы;  $\omega$  – угловая частота вынужденных вертикальных колебаний;  $t$  – время. При этом бетонная смесь представлена полупространством относительно каждой стороны вертикальной плиты.

Реологическую модель уплотняемой среды, которая учитывает действие упругих, диссипативных и инерционных сил, возникающих в этой среде при динамическом воздействии, можно представить в виде схемы, изображенной на рис. 2. В соответствии с принятой реологической моделью, исследуем одноосное напряженное состояние, возникающее в уплотняемой среде только в горизонтальном направлении при действии вибрационного возмущения  $Q \sin \omega t$ . При этом зависимость между напряжением и деформацией в бетонной среде представим в виде уравнения, учитывающее действие упругих, диссипативных и инерционных сил, существенно влияющих на возникновение напряжений:

$$\sigma(x,t) = E \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + \eta \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} - \rho L_1 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + \mu u(x,t), \quad (1)$$

где  $\sigma(x,t)$  – напряжения, возникающие в уплотняемом слое в направлении координатой оси  $X$ ;  $u$  и  $x$  – эйлерова и лагранжева координаты (рис. 1, поз. 4);  $E$  – динамический модуль упругой деформации бетонного слоя смеси;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости, учитывающий внутреннее трение в бетонной смеси;  $\rho$  – плотность бетонной смеси;  $L_1$  – приведенная эффективная длина уплотняемого слоя бетонной смеси в направлении координатой оси  $X$ ;  $\mu$  – коэффициент сопротивления, учитывающий затраты энергии на разрушение внутренних связей, вытеснение воздуха, переориентацию частиц и другие явления в уплотняемой среде, сопровождающие вибрационное уплотнение [11].

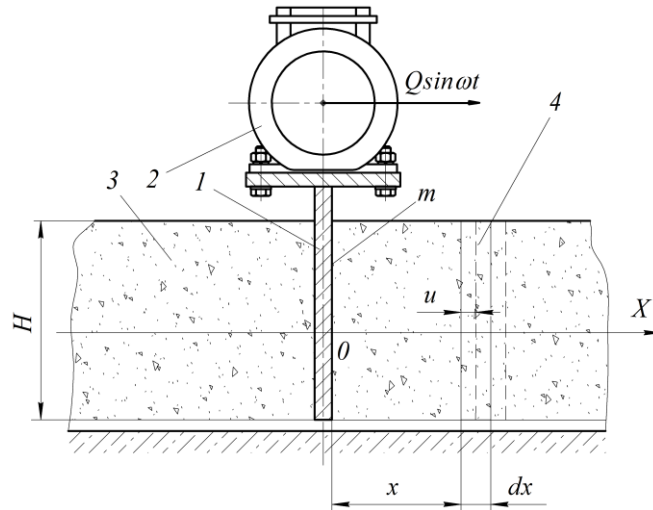


Рисунок 1 – Расчетная схема взаимодействия глубинного уплотнителя с бетонной смесью

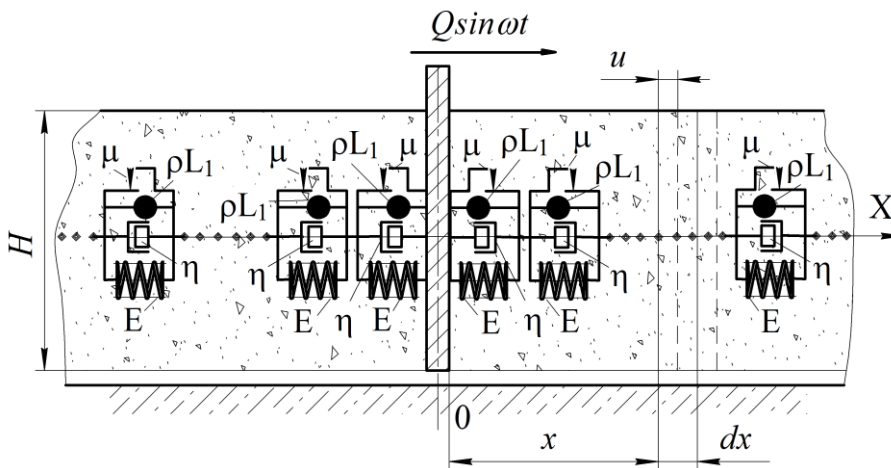


Рисунок 2 – Реологическая модель уплотняемой среды

Колебания слоя бетонной смеси в направлении координаты  $X$  за время  $t$  представим известной зависимостью:

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

которая на основании выражения (1) приводит к следующему волновому уравнению колебаний –

$$E \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x \partial t} - \rho L_1 \frac{\partial^3 u(x,t)}{\partial x \partial t^2} + \mu u(x,t) = \rho \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}. \quad (3)$$

Решение уравнения (3) можно представить в виде мнимой части комплексной функции []:

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

где  $U(x)$  – комплексная амплитуда колебаний, которая должна удовлетворять крайним (граничным) условиям для расчетной схемы, приведенной на рис. 1.

Поведение рассматриваемой динамической системы будет зависеть от крайних условий. В результате перемещения плоскостного виброуплотнителя в прямом направлении по координате  $X$  от нулевого положения, передняя стенка плоскостного уплотнителя, имеющая координату  $x = 0$ , осуществляет сжатие уплотняемой бетонной смеси, а обратная стенка, перемещающаяся в том же направлении, будет оказывать на уплотняемую смесь растягивающее воздействие. Поскольку принято считать [5], что физико-механические характеристики бетонной смеси при вибрационном воздействии одинаковы как при сжатии, так и при растяжении, то достаточно рассмотреть взаимодействие поверхностного уплотнителя только с одной стороны, соответственно вдвое увеличив площадь взаимодействия бетонной среды с поверхностным уплотнителем. При этом крайние условия будут иметь вид:

$$-m \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial t^2} - b \frac{\partial u(0,t)}{\partial t} - cu(0,t) + EF \frac{\partial u(0,t)}{\partial x} + \eta F \frac{\partial u(0,t)}{\partial t} -$$

$$-\rho L_1 F \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial t^2} + \mu F u(0,t) = Q \sin \omega t ; \quad (5)$$

$$\frac{\partial u(L,t)}{\partial x} = 0, \quad (6)$$

где  $m$  – масса плоскостного глубинного виброуплотнителя;  $F$  – площадь вертикальной плиты, контактирующая с уплотняемой бетонной смесью;  $L$  – длина полуволны распространяемого в бетонной среде вибрационного возмущения,

$$L = \frac{\pi}{\omega} \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

Первое краевое условие (5) описывает взаимодействие вертикальной плиты с уплотняемой бетонной смесью, а второе краевое условие (6) показывает, что распространение волны возмущения ничем не ограничено и при расстоянии, равном длине четверти волны относительная деформация уплотняемой среды равна нулю, т.е.  $\frac{\partial u(L,t)}{\partial x} = 0$ . 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), получим уравнение для определения комплексной амплитуды колебаний:

$$\frac{\partial^2 U(x)}{\partial x^2} + \frac{\mu + \rho L_1 \omega^2 + i\eta\omega}{E} \cdot \frac{\partial U(x)}{\partial x} + \frac{\rho\omega^2}{E} U(x) = 0. \quad (7)$$

Преобразуем выражение (7) к следующему виду:

$$\frac{\partial^2 U(x)}{\partial x^2} + 2(\delta + i\xi) \frac{\partial U(x)}{\partial x} + \frac{\rho\omega^2}{E} U(x) = 0, \quad (8)$$

где  $\delta$  – коэффициент затухания возмущения в уплотняемом слое бетонной смеси,

$$\delta = \frac{\mu + \rho L_1 \omega^2}{2E}; \quad (9)$$

$$k = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{\rho\omega^2}{E} + \xi^2 - \delta^2 \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{\rho\omega^2}{E} + \xi^2 - \delta^2 \right)^2 + \xi^2 \delta^2}}; \quad (16)$$

$$\alpha = \sqrt{-\frac{1}{2} \left( \frac{\rho\omega^2}{E} + \xi^2 - \delta^2 \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{\rho\omega^2}{E} + \xi^2 - \delta^2 \right)^2 + \xi^2 \delta^2}}. \quad (17)$$

Используя выражения (12) и (14), представим решение уравнения (8) в следующем виде:

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

При подстановке зависимости (18) в комплексную функцию (4), найдем решение уравнения (3) в следующей комплексной форме:

$\xi$  – коэффициент диссипации,

$$\xi = \frac{\eta\omega}{2E}. \quad (10)$$

При решении характеристического уравнения, составленного для уравнения (8), найдем корни этого уравнения:

$$k_{1-2} = -(\delta + i\xi) \pm i \sqrt{\frac{\rho\omega^2}{E} + \xi^2 - \delta^2 - 2i\delta\xi}. \quad (11)$$

Используя корни (11) характеристического уравнения, найдем решение уравнения (8) в следующей форме:

$$U(x) = e^{(\delta+i\xi)x} (B e^{i\tilde{k}x} + D e^{-i\tilde{k}x}), \quad (12)$$

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

$$\tilde{k} = \sqrt{\frac{\rho\omega^2}{E} + \xi^2 - \delta^2 - 2i\delta\xi}. \quad (13)$$

На основании полученной зависимости (13) комплексное волновое число  $\tilde{k}$  можно представить в следующем виде [5]:

$$\tilde{k} = k - i\alpha, \quad (14)$$

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

Для определения волнового числа  $k$  и коэффициента поглощения  $\alpha$  приравняем выражения (14) и (13), возведем правую и левую части полученного равенства в квадрат и, выделяя отдельно мнимую и вещественную части, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} k^2 - \alpha^2 = \frac{\rho\omega^2}{E} + \xi^2 - \delta^2; \\ \alpha k = \delta\xi. \end{cases} \quad (15)$$

Откуда найдем

$$u(x,t) = e^{-\delta x} [B e^{(ik+\alpha)x} + D e^{-(ik+\alpha)x}] e^{i(\omega t - \xi x)}. \quad (19)$$

Подставляя зависимость (19) в краевое условие (6), найдем соотношение между постоянными интегрирования  $B$  и  $D$ :

$$B = -D \frac{M - iN}{d + i\lambda}. \quad (20)$$

где

$$d = e^{\alpha L} [(\delta - \alpha) \cos kL + (k - \xi) \sin kL]; \quad (21)$$

$$\lambda = e^{\alpha L} [(\delta - \alpha) \sin kL - (k - \xi) \cos kL]; \quad (22)$$

$$M = e^{-\alpha L} [(\delta + \alpha) \cos kL + (k + \xi) \sin kL]; \quad (23)$$

$$N = e^{-\alpha L} [(\delta + \alpha) \sin kL - (k + \xi) \cos kL]; \quad (24)$$

Подставляя соотношение между комплексными амплитудами (20) в выражение (19), получим решение уравнения (3) в следующем виде:

$$u(x, t) = De^{-\delta x} \exp[i(\omega t - \xi x)] \times \left[ \frac{(d + i\lambda)e^{-(\alpha + ik)x} - (M - iN)e^{(\alpha + ik)x}}{d + i\lambda} \right]. \quad (25)$$

Путем подстановки зависимости (25) в краевое условие (5) найдем постоянную интегрирования  $D$  (комплексную величину):

$$D = \frac{Q(d + i\lambda)}{(d - M) + i(\lambda + N)} \times \left[ -m\omega^2 - 0,5F(\rho L_1 \omega^2 + \mu + i \cdot 0,5\eta\omega) + EF(\alpha + ik) \frac{(d + M) + i(\lambda - N)}{(d - M) + i(\lambda + N)} \right]^{-1}. \quad (26)$$

Подставляя постоянную интегрирования  $D$  (26) в зависимость (19), найдем решение волнового уравнения колебаний (3), удовлетворяющего краевым условиям (5) и (6), в комплексной форме:

$$u(x, t) = Qe^{-\delta x} \frac{(d + i\lambda)e^{-(\alpha + ik)x} - (M - iN)e^{(\alpha + ik)x}}{(d - M) + i(\lambda + N)} \times \left[ -m\omega^2 - 0,5F(\rho L_1 \omega^2 + \mu + i \cdot 0,5\eta\omega) + EF(\alpha + ik) \frac{(d + M) + i(\lambda - N)}{(d - M) + i(\lambda + N)} \right]^{-1} e^{i(\omega t - \xi x)}. \quad (27)$$

Полученные зависимости позволяют установить закон колебаний глубинного вибрационного уплотнителя, обеспечивающий эффективное уплотнение умеренно жестких и жестких бетонных смесей с высокой производительностью до значений, требуемых технологическими нормами. Они позволяют, на основании учета реальных физико-механических характеристик уплотняемой среды, определить рациональные параметры вибрационной машины и режимы вибрационного воздействия на уплотняемую смесь.

**ВЫВОДЫ.** На основе анализа существующих конструкций и способов глубинного уплотнения бетонных смесей предложен глубинный уплотнитель в виде плоской вертикальной плиты, в верхней части которой смонтирован вибровозбудитель горизонтальных колебаний. Составлена математическая модель динамической системы вибрационного глубинного уплотнителя при взаимодействии его бетонной смесью. Определена закономерность движения уплотняемой смеси и глубинного уплотнителя в комплексной форме в зависимости от физико-механических характеристик уплотняемой среды, толщины уплотняемого слоя, угловой частоты колебаний и геометрических параметров уплотнителя. Приведенные зависимости позволяют обосновать рациональные параметры вибрационной машины и режимы вибрационного воздействия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов С.М. Теория и практика формирования комплексов и систем машин в строительстве. М.: Берлин: Медиа, 2015. 271 с.
2. Волков С.А., Евтюков С.А. Строительные машины. СПб.: ДНК, 2012. 597 с.
3. Стаценко А.С. Технология каменных работ в строительстве. Минск: Выш. шк. 2010. 255 с.
4. Герасимов М.Д., Герасимов Д.М. Определение закона движения, скорости и ускорения центра масс планетарного вибровозбудителя. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 12. С. 8–11.
5. Иткин А.Ф. Вибрационные машины для формирования бетонных изделий. К.: «МП Леся», 2009. 152 с.
6. Жанар Батсайхан. Исследование взаимодействия вибрационной плиты рабочего органа с уплотняемой средой. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2015. Вип. 1 (90), частина 1. С. 92–97.
7. Chen X., Wu S., Zhou J. Experimental study and analytical formulation of mechanical behavior of concrete. Construction and Buildings Materials. 2013. Vol. 47. PP. 662–670.
8. P.F.G. Banfill, et al. Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation. Cement and Concrete Research. 2011. Vol. 41, № 9. PP. 932–941.
9. Hu C., Larrard F. The Rheology of Fresh High-Performance Concrete. Cement and Concrete Research. 1996. Vol. 26, № 2. PP. 283–294.
10. Маслов А.Г., Саленко Ю.С., Маслова Н.А. Исследование взаимодействия вибрирующей плиты с цементобетонной смесью. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2011. Вип. 2 (67), частина 1. С. 93–98.
11. Маслов А.Г., Жанар Батсайхан. Исследование колебаний рабочего органа машины для уплотнения бетонных смесей в вибрационном рабочем режиме. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, 2015. Вип. 2 (91), частина 1. С. 92–97.

**THEORETICAL STUDIES OF THE INTERACTION  
OF PLANAR DEEP VIBRATORY COMPACTOR WITH CONCRETE MIXTURE**

**A. Maslov, Janar Batsaikhan**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

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

**Purpose.** To study the interaction of planar depth vibration compactor to the concrete medium which are presented in the form of a half-space. **Methodology.** The advantage of deep compaction of concrete mix is described. Based on the analysis of existing structures and methods of deep compaction of concrete mixes, a deep sealer in the form of a flat vertical plate is proposed, in the upper part of which a horizontal vibration exciter is mounted. To determine the character of the interaction of the vibrational compaction depth with the concrete mixture, the dynamic system "vibro – compaction-concrete medium" was studied, in which the latter is presented in the form of a system with distributed parameters, taking into account the elastic, viscous, inertial and energy properties of the compacted concrete mixture. The partial differential equation describing the change of stresses in the compacted medium depending on the dynamic elastic modulus, coefficient of dynamic viscosity, coefficient of inelastic resistance and inertia of the compacted medium in functional dependence on the density, relative deformation and consistency of the concrete mixture is composed. An oscillation wave equation describing the propagation of viscous-elastic-plastic deformation waves in a compacted concrete mixture has been developed. Boundary conditions have been used to solve the wave equation of oscillations. The first boundary condition describes the force interaction of a vertical plate with a compacted concrete medium under the action of harmonic perturbation, represented as an imaginary part of the complex function. The second boundary condition describes the propagation of deformation waves in the half-space and shows that the propagation of the perturbation wave is unlimited and at a distance equal to the length of a quarter of the wave, the relative deformation of the compacted medium is zero. The constant of integration (complex function), satisfying the boundary conditions has been found. **Results.** Based on the solution of the wave equation of oscillations describing the propagation of deformation waves in the half-space, the phase velocity of the propagation of the deformation wave, the wave number and the perturbation absorption coefficient in the compacted medium have been determined. The law of propagation of viscous-elastic-plastic deformation waves in a compacted concrete mixture is represented as a half-space in a complex form. **Originality.** Theoretical expressions that accurately describe the behavior of a real dynamical system "vibration machine - compacted environment" compaction of concrete mixes deep vibration compactor, both from plastic and from hard concrete mixtures, by the application of horizontally directed oscillations have been highlighted. **Practical.** The obtained analytical dependences allow to substantiate the rational parameters of the deep vibrating compactor, to choose a rational method of vibration impact on the compacted medium and the appropriate mode of operation depending on the consistency of the concrete mixture and the thickness of the compacted layer. References 11, tables 0, figures 21.

**Key words:** deep vibroflotation, concrete mixture, the interaction, the wave equation.

REFERENCES

1. Kuznecov, S.M. (2015), *Teoriya i praktika formirovaniya kompleksov i sistem mashin v stroitel'stve* [Theory and practice of formation of complexes and systems of machines in construction], "Media", M.–Berlin.
2. Volkov, S.A., Evtyukov, S.A. (2012), *Stroitel'nye mashiny* [Construction machinery]. "DNK", SPb, Russia.
3. Stacenko, A.S. (2010) *Tekhnologiya kamennyh rabot v stroitel'stve* [Technology of stone works in construction], "Vysh. shk.", Minsk, Belorussia.
4. Gerasimov, M.D., Gerasimov, D.M. (2013), "Determination of the law of motion, speed and acceleration of the center of mass of the planetary vibration exciter", *International journal of applied and fundamental research*, No. 12, pp. 8-11.
5. Itkin, A.F. (2009), *Vibratsionnyie mashinyi dlya formovaniya betonnyih izdeliy* [Vibrating machines for molding concrete products], "Les MP", Kyiv, Ukraine.
6. Batsaikhan, Zhanar (2015), "Study of the interaction of the vibration plate working body with sealed medium", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, Issue (90), pp. 92 – 97
7. Chen, X., Wu, S., Zhou, J. (2013), Experimental study and analytical formulation of mechanical behavior of concrete, *Construction and Buildings Materials*, 47, p. 662–670.
8. Banfill, P.F.G. et al. (2011), "Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation," *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 9, pp. 932-941.
9. Hu, C., Larrard, F. (1996), The Rheology of Fresh High-Performance Concrete," *Cement and Concrete Research*, V. 26, No. 2, pp. 283-294.
10. 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*, Issue (67), pp. 93 – 98.
11. Maslov, A. G., Batsaikhan, Zh. (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*, Issue (91), pp. 92 – 97.

Стаття надійшла 19.03.2018.