

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНА ДВИЖЕНИЯ ПОДВИЖНОЙ РАМЫ
ВИБРОПЛОЩАДКИ С ПОЛИМЕРНЫМ БЕТОНОМ ПРИ ЕГО УПЛОТНЕНИИ****А. Г. Маслов, Д. В. Савелов**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: dvsavelov@gmail.com

Для теоретического определения закона движения подвижной рамы вибрационной площадки с полимерным бетоном выполнено исследование динамической системы «вибрационная площадка – полимерный бетон». В рассматриваемой динамической системе уплотняемый полимерный бетон представлен в виде системы с распределенными параметрами, которая учитывает действие упругих и диссипативных сил сопротивления, действующих со стороны полимерного бетона при его деформировании в форме на подвижной раме вибрационной площадки. В соответствии с принятой реологической моделью полимерного бетона предложена зависимость в частных производных между напряжением и деформацией для условий одноосного напряженного состояния. Составлено волновое уравнение колебаний, которое описывает распространение упруго-вязких волн деформации в полимерном бетоне, который уплотняется на подвижной раме вибрационной площадки. Решение волнового уравнения колебаний позволило выявить закономерность распространения упруго-вязких волн деформации в полимерном бетоне, определить физико-механические характеристики уплотняемого полимерного бетона, закон движения и амплитуду колебаний вибрационной площадки.

Ключевые слова: вибрационная площадка, полимерный бетон, колебания, деформация.**ТЕОРЕТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОНУ РУХУ РУХЛИВОЇ РАМИ ВІБРОМАЙДАНЧИКА
З ПОЛІМЕРНИМ БЕТОНОМ ПРИ ЙОГО УЩІЛЬНЕННІ****О. Г. Маслов, Д. В. Савелов**Кременчугський національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: dvsavelov@gmail.com

На підставі ретельного аналізу науково-технічної літератури встановлено, що для масового виробництва якісних матеріалів і виробів з полімерних бетонних композицій найбільш ефективним буде вібраційний метод ущільнення, який має на увазі, що при їх отриманні віброуючі робочі органи технологічного обладнання, що формує, взаємодіють з полімерною бетонною масою. Для теоретичного визначення закону руху вібраційного майданчику з полімерним бетоном виконано дослідження динамічної системи «вібраційний майданчик – полімерний бетон». У даній динамічній системі ущільнюваний полімерний бетон представлений у вигляді системи з розподіленими параметрами, яка враховує дію пружних і дисипативних сил опору, що діють з боку полімерного бетону при його деформуванні у формі на вібраційному майданчику. Відповідно до прийнятої реологічної моделі полімерного бетону для умов одноосного напруженого стану запропонована залежність у приватних похідних між напруженням і деформацією полімерного бетону, характер якої залежить від динамічного модуля пружної деформації, динамічного модуля пружної деформації Максвелла та коефіцієнта динамічної в'язкості. Складено хвильове рівняння коливань, яке описує поширення пружно-в'язких хвиль деформації у полімерному бетоні, що деформується на вібраційному майданчику. Для розв'язання хвильового рівняння коливань складено граничні умови. Перша гранична умова описує взаємодію днища форми з основою шару полімерного бетону, що ущільнюється. Друга гранична умова описує стан вільної поверхні полімерного бетону у формі, на якій відносна деформація дорівнює нулю. Знайдено постійні інтегрування (комплексні амплітуди), які задовольняють прийнятим граничним умовам. На підставі розв'язання хвильового рівняння коливань, що описує поширення хвиль деформації у полімерному бетоні, що ущільнюється, визначено: закономірність поширення пружно-в'язких хвиль деформації у полімерному бетоні, що ущільнюється, а також теоретичні вирази для чисельного визначення наведених коефіцієнтів жорсткості та дисипативного опору полімерного бетону, приєднаної маси; закон руху і амплітуду коливань вібраційного майданчику, а також закономірності руху поверхневого шару полімерного бетону. Отримані теоретичні залежності дозволяють обґрунтовано визначити раціональні параметри вібраційного майданчику залежно від фізико-механічних властивостей полімерного бетону, що ущільнюється, а отримані результати можуть надалі використовуватися для проведення теоретичних досліджень для аналітичного визначення закону зміни напружень, що виникають в ущільнюваному шарі полімерного бетону при вібраційному ущільненні.

Ключові слова: вібраційний майданчик, полімерний бетон, коливання, деформація.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В современном строительном производстве потребность в полимерных бетонах с высокими физико-механическими характеристиками существенно расширяется. При этом для массового производства качественных строительных изделий из полимерных бетонных композиций в Украине наиболее эффективным будет вибрационный метод уплотнения, который подразумевает, что при их получении вибрирующие

рабочие органы уплотняющего оборудования будут взаимодействовать с полимерной бетонной массой.

Известно, что систематические исследования-технологии изготовления полимерных бетонов, их физико-механических свойств и рациональных областей применения начались несколько позже, чем цементных бетонов. Если исследования вибрационного уплотнения цементных бетонов при их модельном представлении представлены достаточно полно [1–6], а сами они в широких масштабах при-

меняются во многих странах в самых разнообразных областях строительства, то вопросы теории и практики вибрационной обработки полимерных бетонов находятся на стадии исследования [6–9]. В результате на сегодняшний день нет серийно выпускаемого эффективного вибрационного оборудования и доступной технологии изготовления полимербетонных конструкций и не выявлены научно обоснованные области их применения.

Все это говорит о том, что проведение теоретических исследований, направленных на точное определение закона движения виброплощадки и режимов вибрационного воздействия в зависимости от размера, конфигурации изделия и физико-механических характеристик уплотняемого материала является весьма актуальной задачей.

Целью настоящих исследований является теоретическое определение закона движения подвижной рамы виброплощадки с полимерным бетоном при его модельном представлении.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. На закон движения виброплощадки и эффективность уплотнения полимерного бетона значительное влияние оказывают инерционные, упругие и диссипативные силы сопротивления. Эти силы возникают в результате взаимодействия подвижной рамы виброплощадки с полимерным бетоном и непосредственно влияют на процесс его уплотнения в целом. При этом величина возникающих сил сопротивления существенно зависит от физико-механических характеристик уплотняемого полимерного бетона, амплитуды и частоты вынужденных колебаний, толщины уплотняемого слоя, а также направления и вида прикладываемой вибрационной нагрузки.

Для определения сил сопротивления, действующих в вертикальном направлении со стороны полимерного бетона на подвижную раму виброплощадки, рассмотрим расчетную схему, приведенную на рис. 1.

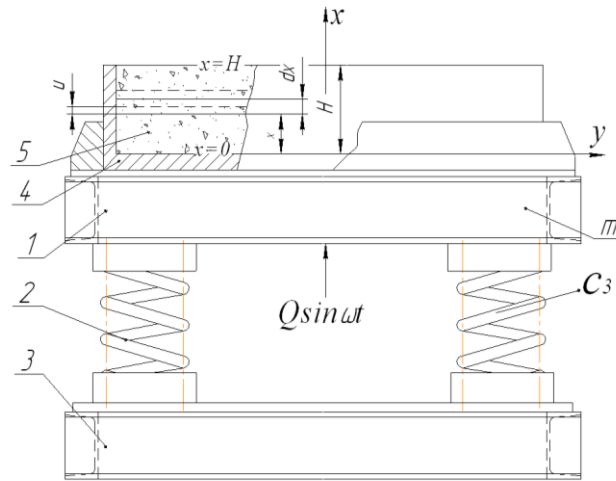


Рисунок 1 – Расчетная схема динамической системы «виброплощадка – полимерный бетон»: 1 – подвижная рама; 2 – упругий амортизатор; 3 – основание; 4 – форма; 5 – полимерный бетон

Для этого исследуем процессы, происходящие в динамической системе «виброплощадка – полимерный бетон», в которой полимерный бетон представлен в виде системы с распределенными параметрами.

В рабочем режиме на подвижную раму 1 виброплощадки, которая установлена на упругих амортизаторах 2 на основании 3, действует возмущение в виде вертикально направленной гармонической силы $Q \sin \omega t$. В результате этого, подвижная рама 1 вместе с формой 4 совершает колебания в вертикальной плоскости и подвергает вибрационному воздействию полимерный бетон 5. В результате такого воздействия происходит уплотнение полимерного бетона.

В соответствии с предложенной реологической моделью полимерного бетона [8], зависимость между напряжением и деформацией в полимерном бетоне имеет вид:

$$\sigma(x,t) = E_1 \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + \eta \cdot \left(\frac{E_1 + E_2}{E_2} \right) \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x \partial t} -$$

$$- \left(\frac{\eta \cdot \rho}{E_2} \right) \frac{\partial^3 u(x,t)}{\partial t^3}, \quad (1)$$

где $\sigma(x,t)$ – напряжения, возникающие в уплотняемом слое полимерного бетона; u и x – эйлерова и лагранжева координаты; E_1 и E_2 – динамические модули упругой деформации полимерного бетона; η – коэффициент динамической вязкости, учитывающий внутреннее трение в полимерном бетоне; ω – угловая частота вынужденных колебаний; t – текущее время.

Колебания слоя полимерного бетона в направлении координаты x за время t будет иметь вид [9]:

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

где ρ – плотность полимерного бетона.

Подставив выражение (1) в (2), получим дифференциальное уравнение движения уплотняемого полимерного бетона в виде:

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + \eta \cdot \left(\frac{E_1 + E_2}{E_1 \cdot E_2} \right) \cdot \frac{\partial^3 u(x,t)}{\partial x^2 \partial t} - \left(\frac{\eta \cdot \rho}{E_1 \cdot E_2} \right) \cdot \frac{\partial^3 u(x,t)}{\partial t^3} = \left(\frac{\rho}{E_1} \right) \cdot \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}. \quad (3)$$

Определение функциональных значений E_1 , E_2 и η приведено в работе [8].

Решение уравнения (3) представим в виде мнимой части комплексного числа [9, 10]:

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

где $u(x)$ – комплексная амплитуда колебаний, удовлетворяющая граничным условиям для представленной на рис. 1 расчетной схемы.

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

при $x=0$ описывается взаимодействие днища формы с основанием уплотняемого слоя полимерного бетона:

$$-m \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial t^2} - c_3 u(0,t) + E_1 F \frac{\partial u(0,t)}{\partial x} + \lambda F \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial x \partial t} - \xi F \frac{\partial^3 u(0,t)}{\partial t^3} = -Q \sin(\omega t); \quad (5)$$

при $x=H$ описывается состояние свободной поверхности полимерного бетона в форме, на которой относительная деформация равна нулю:

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

где m – масса подвижной рамы виброплощадки вместе с формой; c_3 – жесткость упругих амортизаторов; Q – амплитуда возмущающей силы; ω – угловая частота вынужденных колебаний; H – высота уплотняемого слоя; F – рабочая площадь днища формы с полимерным бетоном; $\lambda = \eta \cdot ((E_1 + E_2)/E_2)$; $\xi = \eta \cdot \rho / E_2$.

Подставим функцию $u(x,t)$ из выражения (4) в волновое уравнение колебаний (3) и, после проведения преобразований, получим уравнение для нахождения комплексной амплитуды колебаний $u(x)$ в виде:

$$\left(1 + i\omega \cdot \left(\frac{E_1 + E_2}{E_1 \cdot E_2} \right) \right) \frac{\partial^2 u(x)}{\partial x^2} + \frac{\rho \cdot \omega^2}{E_1} \cdot \left(1 + i \frac{\eta \cdot \omega}{E_2} \right) \cdot u(x) = 0. \quad (7)$$

При решении характеристического уравнения, составленного для уравнения (7), найдем его корни:

$$k_{1-2} = \pm i \sqrt{\frac{\rho \omega^2 \{E_1 E_2 - \eta \omega^2 (E_1 + E_2) - i E_2 \omega ((E_1 + E_2) - \eta E_1)\}}{(E_1 E_2)^2 + \omega^2 (E_1 + E_2)^2}}. \quad (8)$$

Используя выражение (8) найдем решение уравнения (7) в виде:

$$u(x) = B \cdot e^{-i\tilde{k} \cdot x} + D \cdot e^{i\tilde{k} \cdot x}, \quad (9)$$

где B и D – постоянные интегрирования (комплексные амплитуды), определяемые граничными условиями (5) и (6); \tilde{k} – комплексное волновое число:

$$\tilde{k} = \sqrt{\frac{\rho \omega^2 \{E_1 E_2 - \eta \omega^2 (E_1 + E_2) - i E_2 \omega ((E_1 + E_2) - \eta E_1)\}}{(E_1 E_2)^2 + \omega^2 (E_1 + E_2)^2}}. \quad (10)$$

Комплексное волновое число \tilde{k} можно представить в следующем виде [2, 9]:

$$\tilde{k} = k - i\alpha, \quad (11)$$

где k – волновое число; α – коэффициент поглощения вибрационной нагрузки, который характеризует уменьшение амплитуды колебаний при удалении от источника возмущения.

Для нахождения значений волнового числа k и коэффициента поглощения α приравняем выражения (10) и (11), возведем левую и правую части в квадрат и, выделяя соответственно вещественную и мнимую части, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} k^2 - \alpha^2 = -z_1; \\ 2 \cdot k \cdot \alpha = -z_2, \end{cases} \quad (12)$$

где z_1 и z_2 определяются из выражений:

$$z_1 = \frac{\rho \cdot \omega^2 \cdot (E_1 \cdot E_2 - \eta \cdot \omega^2 \cdot (E_1 + E_2))}{(E_1 \cdot E_2)^2 + \omega^2 \cdot (E_1 + E_2)^2}; \quad (13)$$

$$z_2 = \frac{\rho \cdot \omega^3 \cdot E_2 \cdot ((E_1 + E_2) - \eta \cdot E_1)}{(E_1 \cdot E_2)^2 + \omega^2 \cdot (E_1 + E_2)^2}. \quad (14)$$

Решая уравнения системы (12) найдем:

$$\alpha = \sqrt{0,25 \cdot z_1 + \sqrt{z_1^2 + 2 \cdot z_2^2}}; \quad (15)$$

$$k = \sqrt{-0,75 \cdot z_1 + \sqrt{z_1^2 + 2 \cdot z_2^2}}. \quad (16)$$

Используя выражение (11), приведем найденное решение (9) уравнения (7) к виду:

$$u(x) = B \cdot e^{-(ik+\alpha) \cdot x} + D \cdot e^{(ik+\alpha) \cdot x}. \quad (17)$$

Подставив выражение (17) в комплексную функцию (4), найдем решение уравнения (3) в следующем виде

$$u(x,t) = \left[B \cdot e^{-(ik+\alpha) \cdot x} + D \cdot e^{(ik+\alpha) \cdot x} \right] \cdot e^{i\omega t}. \quad (18)$$

Для определения постоянных интегрирования B и D подставим выражение (18) в граничное условие (6) и, проведя преобразования, найдем соотношение между комплексными амплитудами в виде:

$$B = D \frac{e^{(ik+\alpha) \cdot H}}{e^{-(ik+\alpha) \cdot H}}. \quad (19)$$

Подставляя найденные значения B из соотношения (19) в выражение (18), найдем решение уравнения (3) в виде:

$$u(x,t) = D \cdot \left[\frac{e^{(ik+\alpha) \cdot (H-x)} + e^{-(ik+\alpha) \cdot (H-x)}}{e^{-(ik+\alpha) \cdot H}} \right] \cdot e^{i\omega t}. \quad (20)$$

Подставим выражение (20) в граничное условие (5). На основании (4) выражение $Q \sin(\alpha t)$ в граничном условии (5) может быть представлено в виде мнимой части комплексной функции, а именно $Q \sin(\alpha t) = Q \cdot e^{i\alpha t}$. После проведенных преобразований, получим следующее выражение:

$$2D \cdot \{ch[(ik + \alpha)H] \cdot (m\omega^2 - c_3 + i\omega^3 \xi F) - sh[(ik + \alpha)H] \cdot (ik + \alpha) \cdot F(E_1 - i\omega\lambda)\} = -Q \cdot e^{-(ik + \alpha)H}. \quad (21)$$

Преобразовывая выражение (21), определим постоянную интегрирования D в следующем виде:

$$D = \frac{Q \cdot e^{-(ik + \alpha)H}}{2ch[(ik + \alpha)H](c_3 + c_n - (m + m_n)\omega^2 + i\omega b_n)}; \quad (22)$$

где c_n – приведенный коэффициент жесткости уплотняемого полимерного бетона; m_n – приведенная масса уплотняемого полимерного бетона; b_n – приведенный коэффициент диссипативного сопротивления уплотняемого полимерного бетона:

$$c_n = \frac{F[(\alpha E_1 + k\omega\lambda)sh(2\alpha H) + \alpha\omega\lambda \sin(2kH)]}{[ch(2\alpha H) + \cos(2kH)]}; \quad (23)$$

$$m_n = \frac{FkE_1 \sin(2kH)}{\omega^2 \cdot [ch(2\alpha H) + \cos(2kH)]}; \quad (24)$$

$$b_n = \frac{1}{\omega} \left[\frac{F[(\alpha E_1 + k\omega\lambda) \sin(2kH) + (kE_1 - \alpha\omega\lambda)sh(2\alpha H)]}{[ch(2\alpha H) + \cos(2kH)]} - \xi F \omega^2 \right]. \quad (25)$$

Из выражений (23), (24) и (25) следует, что численные значения коэффициентов c_n , b_n и m_n будут зависеть от площади опорной поверхности F вибрационного рабочего органа; динамических модулей упругой деформации полимерного бетона E_1 и E_2 ; коэффициента динамической вязкости η ; угловой частоты вынужденных колебаний ω ; высоты уплотняемого слоя полимерного бетона H и коэффициента поглощения вибрационной нагрузки α и волнового числа k .

Подставив значение постоянной интегрирования D из (22) в выражение (19), определим постоянную интегрирования B :

$$B = \frac{Q \cdot e^{(ik + \alpha)H}}{2ch[(ik + \alpha)H](c_3 + c_n - (m + m_n)\omega^2 + i\omega b_n)}. \quad (26)$$

Подставляя найденные постоянные интегрирования (22) и (26) в зависимость (18), найдем в комплексной форме решение волнового уравнения колебаний (3), удовлетворяющее граничным условиям (5) и (6):

$$u(x, t) = \frac{Q \cdot ch[(\alpha + ik)(H - x)] \cdot e^{i\omega t}}{ch[(\alpha + ik)H](c_3 + c_n - (m + m_n)\omega^2 + i\omega b_n)}. \quad (27)$$

Умножим числитель и знаменатель выражения (27) на комплексное число $(c_3 + c_n - (m + m_n)\omega^2 - i\omega b_n)$, предварительно вы-

полнив разложение выражений $ch[(\alpha + ik)(H - x)]$ в числителе и $ch[(\alpha + ik)H]$ в знаменателе, и, выделяя из полученного выражения мнимую часть комплексной функции, получим решение волнового уравнения колебаний (3), удовлетворяющее граничным условиям (5) и (6) в следующем виде:

$$u(x, t) = \frac{A}{\sqrt{(ch\alpha H \cos kH)^2 + (sh\alpha H \sin kH)^2}} \times [ch[\alpha(H - x)]\cos[k(H - x)]\sin(\omega t - \varphi) + sh[\alpha(H - x)]\sin[k(H - x)]\cos(\omega t - \varphi)], \quad (28)$$

где A – амплитуда вынужденных колебаний подвижной рамы виброплощадки и нижнего слоя полимерного бетона:

$$A = \frac{Q}{\sqrt{[c_3 + c_n - (m + m_n)\omega^2]^2 + \omega^2 b_n^2}}; \quad (29)$$

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2; \quad (30)$$

$$\varphi_1 = \arctg\left(\frac{\omega b_n}{c_3 + c_n - (m + m_n)\omega^2}\right); \quad (31)$$

$$\varphi_2 = \arctg(th(\alpha H) \cdot tg(kH)). \quad (32)$$

Выражение (28) описывает закон движения уплотняемого подвижной рамой виброплощадки полимерного бетона исследуемой динамической системы «виброплощадка – полимерный бетон» в направлении координаты x в зависимости от угловой частоты вынужденных колебаний ω , амплитуды возмущающей силы Q , толщины уплотняемого слоя H и текущего времени t .

При $x = 0$ выражение (28) описывает закон движения подвижной рамы виброплощадки, а при $x = H$ – закон движения поверхностного слоя полимерного бетона:

$$u(0, t) = A \cdot \sin(\omega t - \varphi_1); \quad (33)$$

$$u(H, t) = \frac{A \cdot \sin(\omega t - \varphi)}{\sqrt{(ch\alpha H \cos kH)^2 + (sh\alpha H \sin kH)^2}}. \quad (34)$$

Учет физико-механических характеристик уплотняемого полимерного бетона позволяет достаточно точно определить закон движения вибрационной площадки и подобрать режимы вибрационного воздействия, при которых обеспечивается наиболее эффективное уплотнение полимерного бетона. Полученные выражения (23)-(25) позволяют определить физико-механические характеристики полимерного бетона при его модельном представлении, которые могут использоваться при исследовании сложных динамических систем.

Удельная приведенная масса m_{ny} , а также удельные приведенные коэффициенты сопротивления b_{ny} и жесткости c_{ny} полимерного бетона при колебаниях подвижной рамы виброплощадки в вертикальном направлении определяются путем деления

m_{ny} , b_n и c_n на площадь F основания формуемого изделия:

$$m_{ny} = m_n / F; \quad b_{ny} = b_n / F; \quad c_{ny} = c_n / F. \quad (35)$$

Теоретические положения проверялись на лабораторной виброплощадке со следующими основными параметрами: масса подвижной рамы $m = 24$ кг; амплитуда возмущающей силы $Q = 981$ Н; угловая частота вынужденных колебаний $\omega = 293$ рад/с; жесткость упругих амортизаторов $c_3 = 235440$ Н/м; амплитуда колебаний подвижной рамы виброплощадки в режиме холостого хода $A_{x,x} = 0,47$ мм. На виброплощадке уплотнялся полимерный бетон в форме размером в плане $0,3 \times 0,3$ м² следующего структурного состава [7]: щебень гранитный фракции 5-20 (50 % от общего объема смеси), песок речной с модулем крупности $M_k = 1,8$ (22-27 %); маршалит фракции 0,05 мм (10-15 %); полиэфирная смола Filabond 2000 PA (5 %); отвердитель МЕКР-НА-2 (0,5...1 %).

На рис. 2 и 3 показано изменение динамических модулей упругой деформации полимерного бетона E_1 и E_2 и коэффициента динамической вязкости η в зависимости от относительной плотности ϵ уплотняемого полимерного бетона.

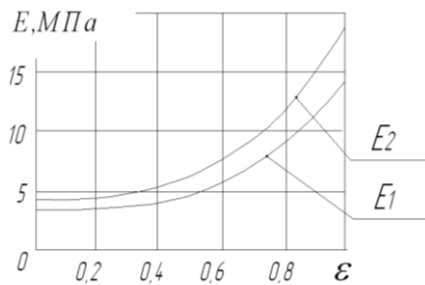


Рисунок 2 – Изменение динамических модулей упругой деформации полимерного бетона E_1 и E_2 в зависимости от относительной плотности ϵ

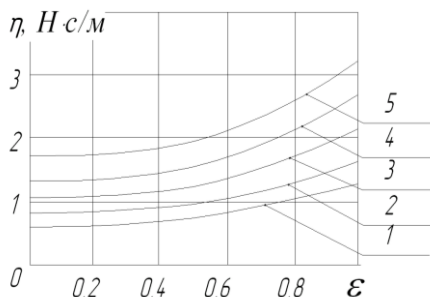


Рисунок 3 – Изменение коэффициента динамической вязкости η в зависимости от относительной плотности ϵ и высоты уплотняемого слоя H :

- 1 – при $H = 50$ мм; 2 – при $H = 60$ мм;
- 3 – при $H = 80$ мм; 4 – при $H = 100$ мм;
- 5 – при $H = 120$ мм

На рис. 4 и 5 показано изменение удельных приведенных коэффициентов жесткости c_{ny} и диссипативного сопротивления b_{ny} полимерного бетона при вертикальных колебаниях подвижной рамы виброплощадки в зависимости от относительной плотности ϵ и высоты уплотняемого слоя H .

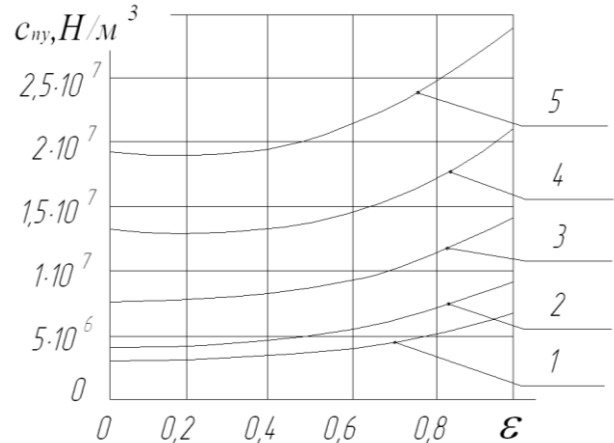


Рисунок 4 – Изменение удельного приведенного коэффициента жесткости c_{ny} полимерного бетона в зависимости от относительной плотности ϵ и высоты уплотняемого слоя H :

- 1 – при $H = 50$ мм; 2 – при $H = 60$ мм;
- 3 – при $H = 80$ мм; 4 – при $H = 100$ мм;
- 5 – при $H = 120$ мм

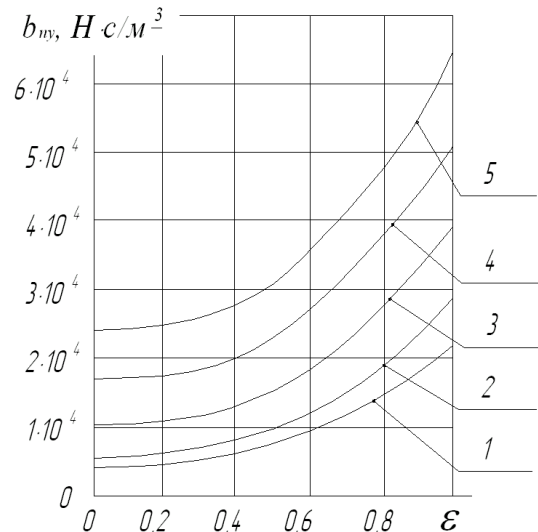


Рисунок 5 – Изменение удельного приведенного коэффициента диссипативного сопротивления b_{ny} полимерного бетона в зависимости от относительной плотности ϵ и высоты уплотняемого слоя H :

- 1 – при $H = 50$ мм; 2 – при $H = 60$ мм;
- 3 – при $H = 80$ мм; 4 – при $H = 100$ мм;
- 5 – при $H = 120$ мм

Анализ полученных данных показывает, что удельные приведенные коэффициенты жесткости и диссипативного сопротивления существенно зависят от высоты уплотняемого слоя H и относительной плотности ρ полимерного бетона.

На рис. 6 показано изменение амплитуды колебаний подвижной рамы виброплощадки A в зависимости от относительной плотности ε и высоты уплотняемого слоя H .

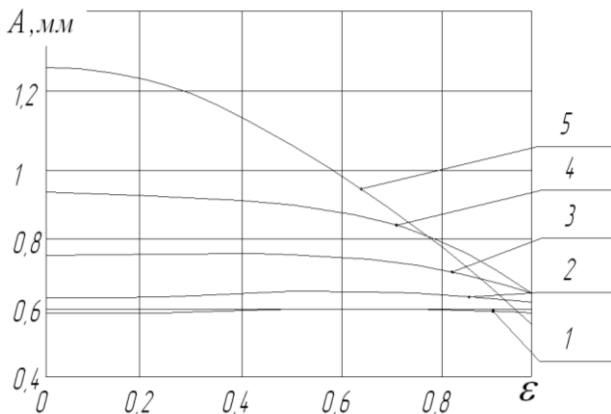


Рисунок 6 – Изменение амплитуды колебаний A подвижной рамы виброплощадки в зависимости от относительной плотности ε и высоты уплотняемого слоя H :
1 – при $H = 50$ мм; 2 – при $H = 60$ мм;
3 – при $H = 80$ мм; 4 – при $H = 100$ мм;
5 – при $H = 120$ мм

Представленные на рис. 6 графические результаты показывают, что существенное влияние на амплитуду колебаний подвижной рамы виброплощадки оказывают физико-механические характеристики уплотняемого полимерного бетона, высота уплотняемого слоя H и его относительная плотность ε .

Так в начале вибрационного процесса уплотнения при значениях относительной плотности ε от 0 до 0,5 амплитуда A вынужденных колебаний подвижной рамы виброплощадки и нижнего слоя полимерного бетона увеличивается в зависимости от высоты уплотняемого слоя H . При дальнейшем увеличении относительной плотности ε численные значения амплитуды колебаний A подвижной рамы виброплощадки уменьшаются для всех значений представленных высот H (рис. 6).

ВЫВОДЫ. На основе анализа известных методов уплотнения строительных смесей предложена расчетная схема вибрационного уплотнения полимерного бетона на виброплощадке с вертикальными колебаниями. Составлена математическая модель динамической системы виброплощадки, взаимодействующей с полимерным бетоном. В результате проведенных исследований получены теоретические выражения, которые позволяют определить закон движения подвижной рамы виброплощадки и полимерного бетона в зависимости от его физико-механических характеристик, амплитуды и частоты вынужденных колебаний и высоты уплотняемого слоя.

Полученные зависимости позволяют обоснованно определить рациональные параметры вибрационной площадки и режимы вибрационного воздействия, при которых будет обеспечиваться наиболее эффективное уплотнение полимерного бетона, а

также могут использоваться при проведении теоретических исследований по аналитическому определению закона изменения напряжений, возникающих в уплотняемом слое полимерного бетона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маслов А. Г., Пономарь В. М. Вибрационные машины и процессы в дорожном строительстве. К.: Будівельник, 1985. 128 с.
2. Жанар Батсайхан. Разработка теории взаимодействия виброплощадки с бетонной смесью. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 2019. Вип. 6/2019 (119). С. 112–117.
3. Маслов А. Г., Иткин А. Ф. Исследование взаимодействия виброплощадки с цементобетонной смесью при вертикальных колебаниях. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*, 2004. Вып. 27. С. 141–144.
4. Маслов А. Г., Иткин А. Ф. Исследование процесса уплотнения цементобетонной смеси на вибродвижной площадке с вертикально направленными колебаниями. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*, 2004. Вип. 6/2004 (29). Кременчук, 2004. С. 86–91.
5. Назаренко І. І., Баранов Ю. О., Басараб В. А. Дослідження взаємодії бетонної суміші з робочим органом електромагнітної ударно-вібраційної установки. *Вібрації в техніці та технологіях*, 2013. Вип. 3(71). С. 55–60.
6. Свідерський А. Т. Дослідження динаміки вібраційної машини із урахуванням напружено-деформованого стану пружно-пластичного середовища. *Вібрації в техніці та технологіях*, 2013. Вип. 3(71). С. 41–45.
7. Маслов А. Г., Савелов Д. В. Разработка структурного состава полимерного бетона. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КрНУ, 2018. Вип. 4/2018 (111). С. 94–99.
8. Маслов А. Г., Савелов Д. В. Реологическая модель вибрирующего полимерного бетона. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, Кременчук: КрНУ, 2019. Вип. 5/2019 (118). С. 135–141.
9. Маслов А. Г., Савелов Д. В. Определение возмущающей нагрузки, необходимой для уплотнения полимерного бетона. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, Кременчук: КрНУ, 2019. Вип. 2/2019 (115). С. 141–145.
10. Савелов Д. В. Разработка теории взаимодействия поверхностного вибрационного рабочего органа с полимерным бетоном при его модельном представлении. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, Кременчук: КрНУ, 2019. Вип. 6/2019 (119). С. 126–132.

**THEORETICAL DEFINITION OF THE LAW OF MOTION FOR MOBILE FRAME
OF A VIBRATING PLATFORM WITH POLYMER CONCRETE WHEN
COMPACTING IT**

O. Maslov, D. Savelov

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

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

Purpose. Based on a detailed analysis of the scientific and technical literature, it was established that for the mass production of quality materials and products from polymer concrete compositions, a vibration method of sealing could be the most effective, which means that when they are received, the vibrating working bodies of the forming technological equipment will interact with the polymer concrete mass. **Methodology.** For the theoretical determination of the nature of the interaction between the surface vibrating working body and polymer concrete, the study of the dynamic system "vibration working body - polymer concrete" was performed. In this dynamic system, compacted polymer concrete is presented in the form of a system with distributed parameters, which takes into account the action of elastic and dissipative resistance forces acting from the polymer concrete side when it is deformed on a vibrating working body. **Results.** In accordance with the accepted rheological model of polymer concrete for the uniaxial stress condition, the dependence in the individual derivatives between the stress and the deformation of the polymer concrete is proposed, the nature of which depends on the dynamic modulus of elastic deformation, the dynamic modulus of Maxwell's elastic deformation and the coefficient of dynamic viscosity. A wave equation of oscillation is proposed, which describes the propagation of elastic-viscous deformation waves in polymer concrete deformed by a surface vibrating working body. To solve the wave equation of oscillations, boundary conditions are drawn. The first boundary condition describes the interaction of a surface vibrating working body with a compacted concrete. The second boundary condition implies that the displacement of the sealed layer of polymer concrete at a certain distance from the surface of the vibrating working body is zero. We find constant integrations (complex amplitudes) that satisfy the accepted boundary conditions. **Originality.** Based on the solution of the wave equation of oscillations describing the propagation of deformation waves in the compacted concrete, it is determined: the regularity of propagation of elastic-viscous deformation waves in the polymeric concrete and the expressions for numerically determining the coefficients of rigidity polymer concrete resistance, law and vibration amplitude of surface vibrating working body. The stresses arising on the surface and depth of the polymer concrete when exposed to the surface vibrating working body are determined. **Practical value.** The obtained theoretical dependences allow us to reasonably determine the rational parameters of the vibration field depending on the physical and mechanical properties of polymer concrete, which is compacted, and the results obtained can be used for conducting theoretical studies to analytically determine the law of stress changes that occur in a narrow layer of polymer concrete..

Key words: vibration platform, polymer concrete, vibrations, deformation.

REFERENCES

1. Maslov, A. G., Ponomar', V. M. (1985), *Vibracionnye mashiny i processy v dorozhnom stroitel'stve* [Vibration machines and processes are in travelling building], Budivel'nik, Kiev, Ukraine.
2. Batsaikhan, Zhanar (2019), "The development of the theory of interaction of a vibrating platform with a concrete mixture", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. Kremenchuk: KRNU*, Issue (119), pp. 112 – 117.
3. Maslov, A. G., Itkin, A. F. (2004), "Investigation of the interaction of a vibrating platform with a cement-concrete mixture during vertical vibrations", *Transactions of Kharkiv national automobile and road University. Kharkiv: KNADU*, Issue (27), pp. 141 – 144.
4. Maslov, A. G., Itkin, A. F. (2004), "Investigation of the process of compaction of cement concrete mix on a vibrating platform with vertically directed vibrations", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. Kremenchuk: KRNU*, Issue 6/2004 (29), pp. 86 – 91.
5. Nazarenko, I. I., Baranov, Yu. O., Basarab, V. A. (2013), "Investigation of the interaction of a concrete mix with the working body of an electromagnetic shock-vibration installation", *Vibrations in engineering and technology*, pp. 55 – 60.
6. Sviders'kij, A. T. (2013), "The study of the dynamics of a vibrating machine with consideration of the stress-strain state of an elastic-plastic medium", *Vibrations in engineering and technology*, pp. 41 – 45.
7. Maslov, A. G., Savelov, D. V. (2018), "Development of structural composition of polymer concrete", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. Kremenchuk: KRNU*, Issue 4/2018 (111), pp. 94 – 99.
8. Maslov, A. G., Savelov, D. V. (2019), "Rheological model of polymer concrete that vibrates", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. Kremenchuk: KRNU*, Issue (118), pp. 135 – 141.
9. Maslov, A. G., Savelov, D. V. (2019), "Determination of excitation load, necessary for sealing polymer concrete", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. Kremenchuk: KRNU*, Issue 2/2019 (115), pp. 141 – 145.
10. Savelov, D. V. (2019), "Development of interaction surface selective working body with polymer concrete during its modeling theory", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. Kremenchuk: KRNU*, Issue 6/2019 (119), pp. 126 – 132.

Стаття надійшла 08.07.2020.