

УДК 624.04 (075)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИОННОЙ ПЛИТЫ РАБОЧЕГО ОРГАНА С УПЛОТНЯЕМОЙ СРЕДОЙ

Жанар Батсайхан

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

Составлена расчетная схема динамической системы "Вибрационный рабочий орган–уплотняемая среда", в которой последняя представлена в виде системы с распределенными параметрами. В результате решения волнового уравнения колебаний определен закон деформирования уплотняемой среды по всей толщине уплотняемого слоя в зависимости от нарастающей под виброплитой плотности уплотняемой смеси, её физико-механических характеристик, толщины уплотняемого слоя, массы виброплиты, частоты и амплитуды возмущающей силы, жесткости и коэффициента неупругого сопротивления упругой подвески. Определены изменения удельного сопротивления уплотняемой бетонной среды в зависимости от её консистенции. Найдены напряжения, возникающие в уплотняемом слое.

Ключевые слова: вибрационная плита, взаимодействие, уплотняемая среда, напряжения.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ ВІБРАЦІЙНОЇ ПЛИТИ РОБОЧОГО ОРГАНУ З СЕРЕДОВИЩЕМ, ЩО УЩІЛЬНЮЄТЬСЯ

Жанар Батсайхан

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

Складена розрахункова схема динамічної системи "Вібраційний робочий орган–середовище що ущільнюється", в якій остання представлена у вигляді системи з розподіленими параметрами. В результаті рішення хвильового рівняння коливань визначений закон деформування середовища що ущільнюється по всій товщині шару, що ущільнюється в залежності від наростаючої під віброплитою щільності ущільнюваної суміші, її фізико-механічних характеристик, товщини шару, що ущільнюється, маси віброплити, частоти і амплітуди вимушених коливань, жорсткості і коефіцієнта непружного опору пружної підвіски. Визначено зміни питомого опору ущільнюваного бетонного середовища в залежності від її консистенції. Знайдені напруги, що виникають у ущільнюваному шарі.

Ключові слова: вібраційна плита, взаємодія, середовище що ущільнюється, напруги.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Физико-механические характеристики уплотняемой среды во многом определяют поведение динамической системы вибрационного рабочего органа и существенно влияют на определение его основных параметров. Достаточно точное выявление физико-механических свойств уплотняемой среды позволяет установить рациональный закон деформирования поверхности уплотняемой среды, определить устойчивый режим работы вибрационного рабочего органа, правильно выбрать технологические параметры вибрационного воздействия на обрабатываемую среду, использование которых обеспечивает эффективное уплотнение с малой энергоемкостью.

В работах [1–3], физико-механические характеристики уплотняемой среды, взаимодействующей с вибрационным рабочим органом, были представлены упругим телом в виде модели Гука [1, 2] или вязкоупругим телом в виде модели Кельвина – Фогта [3]. Такое представление уплотняемой среды не позволяет достаточно точно определить рациональные параметры вибрационного рабочего органа и режимы вибрационного воздействия. Наиболее точное описание дает представление уплотняемой среды в виде системы с распределенными параметрами, учитывающей упругие и вязкие её свойства [4 – 5]. В работе [4] приведено исследование взаимодействия вибрационного рабочего органа с уплотняемой средой при средних показателях динамического модуля упругой деформации и коэффициента динамической вязкости цементобетонной смеси. В работах [5] показано изменение этих физико-

механических характеристик в зависимости от плотности смеси, непрерывно возрастающей в процессе уплотнения стационарной (не перемещающейся) виброплитой. В случае перемещающегося вибрационного рабочего органа происходит нарастание плотности уплотняемой среды по длине виброплиты по некоторому экспоненциальному закону, начиная от передней кромки до задней кромки днища виброплиты. Поэтому для обоснования рациональных параметров перемещающегося вибрационного рабочего органа и определения необходимого режима вибрационного воздействия необходимо точно определить изменение физико-механических характеристик уплотняемой среды по длине виброплиты, т.е. учесть действие инерционных, упругих и неупругих сил сопротивления, которые изменяются в процессе уплотнения смеси по длине виброплиты.

Цель работы – исследование процесса взаимодействия вибрационной плиты с уплотняемой средой и определение рациональных режимов вибрационного уплотнения бетонных смесей различной консистенции перемещающимся вибрационным рабочим органом.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для определения сил сопротивления, возникающих в процессе уплотнения, рассмотрим расчетную схему динамической системы "Вибрационный рабочий орган – уплотняемая среда" (рис. 1), включающей вибрационную плиту 1, подвешенную на упругих амортизаторах 2 к верхней раме 3. Вибрационная плита 1 перемещается в направлении по стрелке со

скоростью V и под действием вертикально направленной гармонической силы $Q \sin \omega t$ осуществляет уплотнение смеси 4, уложенной на жесткое основание 5. Уплотняемую смесь, находящуюся под днищем виброплиты разобьем на элементарные объемы, каждый из которых имеет свои физико-механические характеристики. Исследуем одноосное напряженное состояние в элементарных объемах. При этом зависимость между напряжением и деформацией в уплотняемой среде элементарного объема может быть в первом приближении описана следующим уравнением [6]:

$$\sigma_i(z,t) = E_i \frac{\partial u_i(z,t)}{\partial z} + \mu_i u_i(z,t), \quad (1)$$

где σ_i – напряжения, возникающие в i -том элементарном объеме; u_i и z – эйлерова и лагранжева координаты; E_i – динамический модуль упругой деформации уплотняемой смеси в i -том элементарном объеме; μ_i – коэффициент сопротивления в i -том элементарном объеме, учитывающий сцепление и внутреннее трение в уплотняемой смеси, затраты энергии на разрушение внутренних связей, вытеснение воздуха, переориентацию частиц и другие явления в уплотняемой среде, сопровождающие вибрационное уплотнение [6]

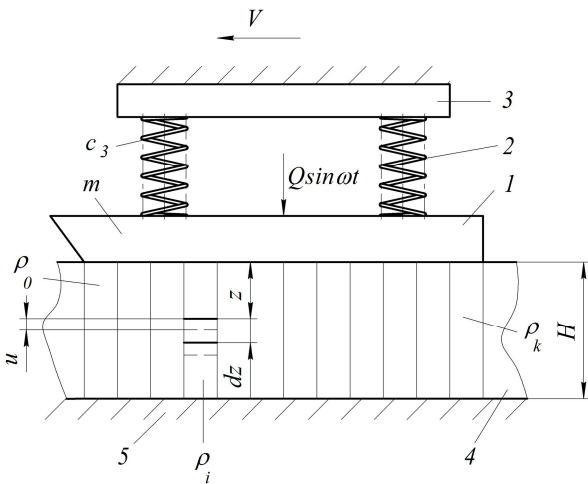


Рисунок 1 – Расчетная схема динамической системы "Вибрационный рабочий орган–уплотняемая среда"

Движение уплотняемой смеси в i -том элементарном объеме в направлении координаты z за время t опишем известным дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial \sigma_i(z,t)}{\partial z} = \rho_i \frac{\partial^2 u_i(z,t)}{\partial t^2} \quad (2)$$

или с учетом зависимости (1) [6] –

$$E_i \frac{\partial^2 u_i(z,t)}{\partial z^2} + \mu_i \frac{\partial u_i(z,t)}{\partial z} = \rho_i \frac{\partial^2 u_i(z,t)}{\partial t^2}. \quad (3)$$

где ρ_i – плотность бетонной смеси в i -том элементарном объеме.

Решение волнового уравнения колебаний (3) для рассматриваемой расчетной схемы (рис. 1) будем отыскивать при следующих граничных условиях:

– при взаимодействии поверхности i -того элементарного объема уплотняемой смеси с виброплитой,

$$m_i \frac{\partial^2 u_i(0,t)}{\partial t^2} + b_{3i} \frac{\partial u_i(0,t)}{\partial t} + c_{3i} u_i(0,t) - E_i F_i \frac{\partial u_i(0,t)}{\partial z} - \mu_i F_i u(H,t) = Q_i \sin \omega t; \quad (4)$$

– при взаимодействии i -того элементарного объема уплотняемой смеси с основанием,

$$u(H,t) = 0, \quad (5)$$

где m_i – удельная масса виброплиты, m/n ; c_{3i} , b_{3i} – удельные коэффициенты жесткости и неупругого сопротивления амортизаторов в вертикальном направлении, c_3/n , b_3/n ; F_i – удельная площадь днища виброплиты, контактирующая с уплотняемым слоем, F/n ; m – масса виброплиты; c_3 , b_3 – коэффициенты жесткости и неупругого сопротивления амортизаторов в вертикальном направлении; F – площадь днища виброплиты, контактирующая с уплотняемым слоем; n – число элементарных объемов; H – высота уплотняемого слоя.

Для решения уравнения (3) представим функцию $u_i(z,t)$ в виде мнимой части комплексной функции [7]:

$$u_i(z,t) = U_i(z) e^{i\omega t}, \quad (6)$$

где $U_i(z)$ – комплексная амплитуда колебаний, удовлетворяющая граничным условиям (4) и (5).

Путем подстановки функции (6) в выражение (3), получим уравнение для определения комплексной амплитуды колебаний:

$$\frac{\partial^2 U_i(z)}{\partial z^2} + 2\delta_i \frac{\partial U_i(z)}{\partial z} + k_i^2 U_i(z) = 0, \quad (7)$$

где k_i – волновое число, $k_i = \omega \sqrt{\rho_i/E_i}$; δ_i – коэффициент затухания возмущения в i -том элементарном объеме уплотняемой смеси, $\delta_i = \mu_i/(2E_i)$.

Найдем решение уравнения (7) и, подставляя его в выражение (6), получим зависимость для определения функции $u_i(z,t)$ в следующем виде:

$$u_i(z,t) = e^{-\delta_i z} (B_i \sin k_{1i} z + D_i \cos k_{1i} z) e^{i\omega t}, \quad (8)$$

где B_i и D_i – постоянные интегрирования (комплексные амплитуды), определяемые граничными условиями (4) и (5); k_{1i} – волновое число с учетом действия коэффициента затухания,

$$k_{1i} = \sqrt{k_i^2 - \delta_i^2} \quad (9)$$

Путем подстановки выражения (8) в граничное условие (5), найдем соотношение между постоянными интегрирования B_i и D_i :

$$B_i = -D_i \frac{\cos k_{1i}H}{\sin k_{1i}H} \quad (10)$$

Подставляя зависимость (10) в выражение (8), найдем искомую функцию $u_i(z, t)$ в следующем виде:

$$u_i(z, t) = D e^{-(\delta_i z - i\omega t)} \frac{\sin k_{1i}(H - z)}{\sin k_{1i}H} \quad (11)$$

Подставляя зависимость (11) в граничное условие (4), найдем постоянную интегрирования D_i :

$$D_i = \frac{Q_i}{[c_{3i} + F_i E_i (k_{1i} \operatorname{ctg} k_{1i} H + \delta_i) - m_i \omega^2] + i b_{3i} \omega} \quad (12)$$

Подставляя выражение (12) в зависимость (11), найдем решение волнового уравнения колебаний (3), удовлетворяющего граничным условиям (4) и (5), в комплексной форме:

$$u_i(z, t) = \frac{Q_i}{[c_{3i} + F_i E_i (k_{1i} \operatorname{ctg} k_{1i} H + \delta_i) - m_i \omega^2] + i b_{3i} \omega} \times \frac{e^{-\delta_i z} \sin k_{1i}(H - z)}{\sin k_{1i}H} e^{i\omega t} \quad (13)$$

Умножая числитель и знаменатель выражения (13) на сопряженное комплексное число, стоящее в фигурных скобках знаменателя, и выделяя из полученного выражения мнимую часть комплексной функции, получим после некоторого преобразования искомое решение уравнения (3), удовлетворяющее граничным условиям (4) и (5), в следующем виде:

$$u_i(z, t) = \frac{e^{-\delta_i z} \sin k_{1i}(H - z)}{\sin k_{1i}H} \times \quad (14)$$

$$\times \frac{Q_i \sin(\omega t - \varphi_i)}{\sqrt{[c_{3i} + F_i E_i (k_{1i} \operatorname{ctg} k_{1i} H + \delta_i) - m_i \omega^2]^2 + b_{3i}^2 \omega^2}},$$

где φ_i – сдвиг фаз между перемещением и амплитудой возмущающей силы,

$$\varphi_i = \operatorname{arctg} \frac{b_{3i} \omega}{c_{3i} + F_i E_i (k_{1i} \operatorname{ctg} k_{1i} H + \delta_i) - m_i \omega^2} \quad (15)$$

Полученное выражение (14) описывает закон движения рассматриваемой динамической системы "Вибрационный рабочий орган – уплотняемая среда". При $z = 0$ это выражение описывает колебания верхнего слоя i -того элементарного объема уплотняемой смеси и виброплиты:

$$u_i(0, t) = A \sin(\omega t - \varphi_i), \quad (16)$$

где

$$A = Q_i / \left\{ [c_{3i} + F_i E_i (k_{1i} \operatorname{ctg} k_{1i} H + \delta_i) - m_i \omega^2]^2 + b_{3i}^2 \omega^2 \right\}^{0,5} \quad (17)$$

Анализ законов движения уплотняемой среды (14) и вибративной плиты (16) показывает, что выражение (17) служит для определения амплитуды вынужденных колебаний вибративной плиты, а выражение

$$c_i = F_i E_i (k_{1i} \operatorname{ctg} k_{1i} H + \delta_i) \quad (18)$$

определяет жесткость i -того элементарного объема уплотняемой смеси.

Из выражения (18) найдем удельное значение коэффициента жесткости $c_{yi} = c_i / F_i$, т.е.

$$c_{yi} = E_i (k_{1i} \operatorname{ctg} k_{1i} H + \delta_i) \quad (19)$$

На основании выражения (17) закон колебаний i -того элементарного объема уплотняемой среды (14) может быть представлен в виде:

$$u_i(z, t) = A e^{-\delta_i z} \frac{\sin k_{1i}(H - z)}{\sin k_{1i}H} \sin(\omega t - \varphi_i) \quad (20)$$

Значение динамического модуля упругой деформации i -того элементарного объема уплотняемой смеси E_i в зависимости от консистенции цементобетонной и её относительной плотности

$$\varepsilon = \frac{\rho_i - \rho_0}{\rho_k - \rho_0} \quad (21)$$

может быть представлено в виде следующей показательной функции:

$$E_i = E_0 \left[1 + \mathcal{J} z^2 \cdot \left(\frac{\rho_i - \rho_0}{\rho_k - \rho_0} \right)^{z_1} \right], \quad (22)$$

где E_0 – динамический модуль упругой деформации неуплотненного слоя смеси при плотности ρ_0 , значения E_0 для различных консистенций бетонных смесей приведены в работе [7]; ρ_k – плотность уплотненного слоя смеси; \mathcal{J} – жесткость бетонной смеси; z_1 и z_2 – показатели степени, принимаемые равными $z_1 = 2$ и $z_2 = 0,33$ для тяжелых бетонных смесей жесткостью $\mathcal{J} = 5$ с, что соответствует осадке конуса $OK = 3,5 \dots 4$ см и жесткостью $30 \dots 120$ с [7].

Значения коэффициента сопротивления μ_i для i -того элементарного объема можно с достаточной степенью точности определить из следующей зависимости:

$$\mu_i = \omega \sqrt{E_i \rho_i} \quad (23)$$

На рис. 2–4 показаны изменения удельного коэффициента жесткости бетонных смесей различной

консистенції при товщинах ущільнюваного шару від 10 до 25 см. Аналіз приведених залежностей показує, що для всіх консистенцій суміші значення удільних коефіцієнтів жорсткості зменшуються з збільшенням товщини ущільнюваного шару.

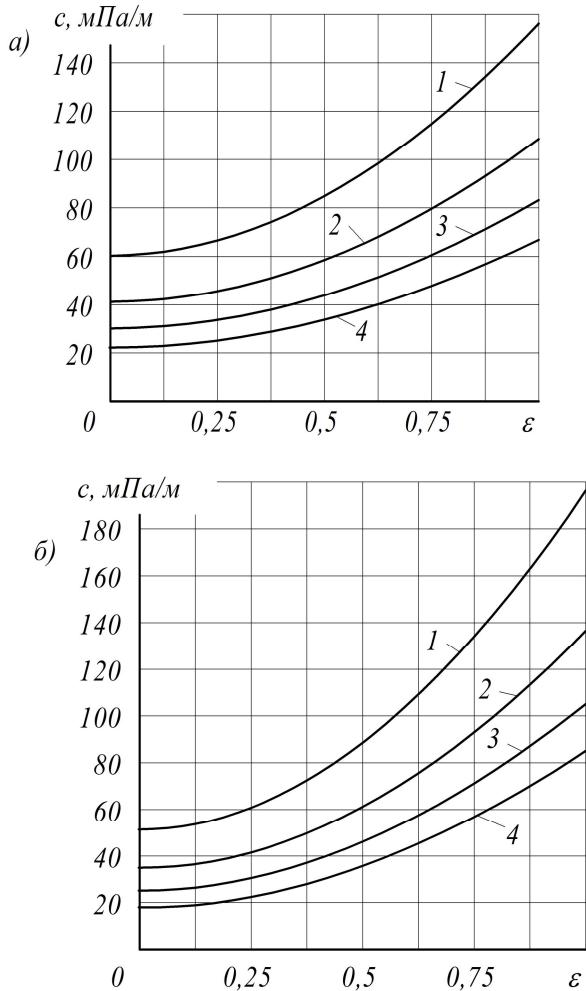


Рисунок 2 – Зміна удільного коефіцієнта жорсткості бетонної суміші з осадкою конуса ОК=3,5 – 4 см (а) і жорсткістю Ж=30 с (б) в залежності від відносної густоти суміші ε :

1 – при товщині ущільнюваного шару $H = 10$ см; 2 – при $H = 15$ см; 3 – при $H = 15$ см; 4 – при $H = 25$ см;

Напруження, що виникають в i -тому елементарному об'ємі ущільнюваної суміші, визначаються шляхом підстановки виразу (20) в залежність (1), т.е.

$$\sigma_i(z,t) = -AE_i \sqrt{k_{li}^2 + \delta_i^2} \times e^{-\delta_i z} \frac{\cos[k_{li}(H-z) + \zeta_i]}{\sin k_{li} H} \sin(\omega t - \varphi_i), \quad (24)$$

де

$$\zeta_i = \arctg \frac{\delta_i}{k_i}.$$

Для ефективного ущільнення необхідно створити в ущільнюваному шарі такі напруження, які

повинні бути більші або рівні мінімальним напруженням, забезпечуваним граничним руйнуванням структурних зв'язків ущільнюваної середовища [7], т.е. повинно виконуватися умову, при якому амплітуда напружень $\sigma_i(H)$, що виникають в основанні ущільнюваного шару, повинна бути не менше мінімального напруження σ_{0i} , при якому відбувається граничне руйнування структурних зв'язків в ущільнюваній середовищі і утворення тиксотропного її стану:

$$\sigma_i(H) \geq \sigma_{0i}, \quad (25)$$

де

$$\sigma_i(H) = -AE_i \sqrt{k_{li}^2 + \delta_i^2} e^{-\delta_i H} \frac{\cos \zeta_i}{\sin k_{li} H}. \quad (26)$$

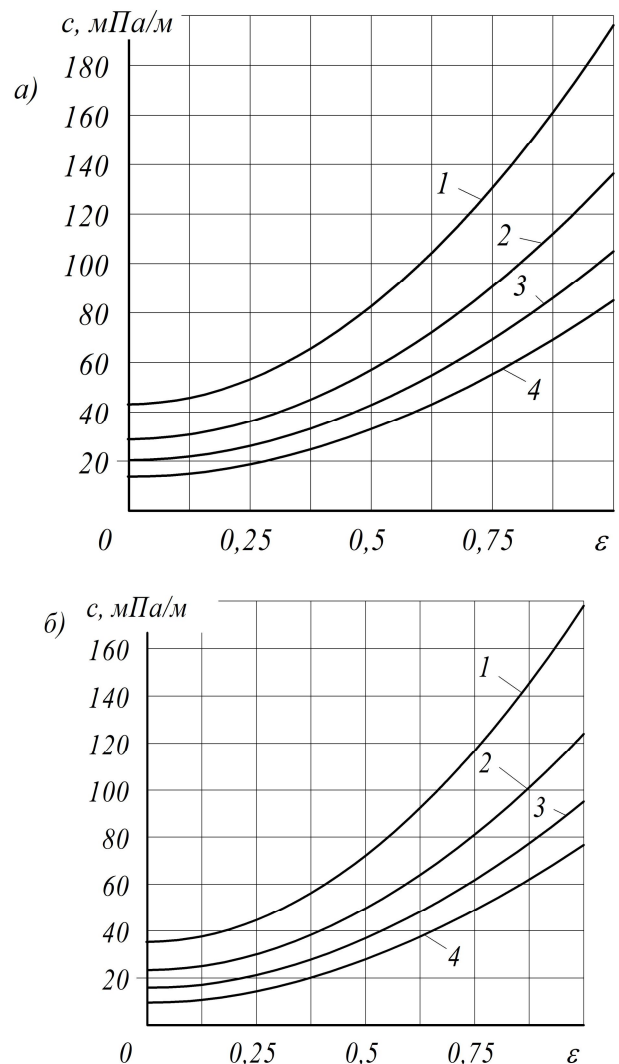


Рисунок 3 – Зміна удільного коефіцієнта жорсткості бетонної суміші жорсткістю Ж=60 с (а) і жорсткістю Ж=90 с (б) в залежності від відносної густоти суміші ε : 1 – при товщині ущільнюваного шару $H = 10$ см; 2 – при $H = 15$ см; 3 – при $H = 15$ см; 4 – при $H = 25$ см

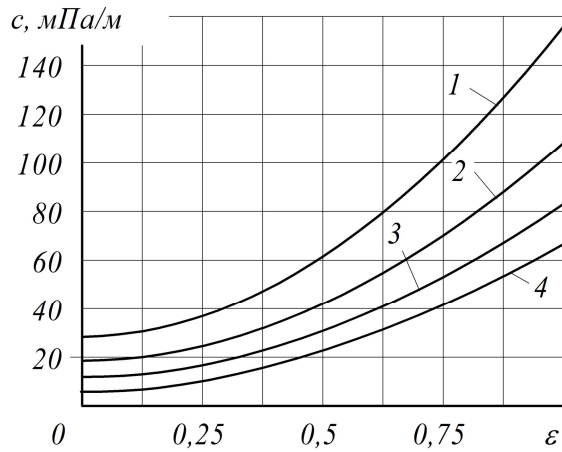


Рисунок 4 – Изменение удельного коэффициента жесткости бетонной смеси жесткостью $Ж=1200$ с зависимости от относительной плотности смеси ε :

- 1 – при толщине уплотняемого слоя $H = 10$ см;
 2 – при $H = 15$ см; 3 – при $H = 15$ см;
 4 – при $H = 25$ см

Амплитуда напряжений, возникающих на поверхности уплотняемого слоя, определится из следующего выражения:

$$\sigma_i(0) = -AE_i \sqrt{k_{1i}^2 + \delta_i^2} \frac{\cos(k_{1i}H + \zeta_i)}{\sin k_{1i}H}. \quad (27)$$

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. 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.

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 вибрационном воздействии в зависимости от физико-механических характеристик уплотняемой среды, толщины уплотняемого слоя, массы вибро-

литы, частоты и амплитуды возмущающей силы, жесткости и коэффициента неупругого сопротивления упругой подвески. Найденные изменения удельного коэффициента жесткости бетонной смеси по длине виброплиты в зависимости от консистенции уплотняемого слоя смеси, позволят сложную динамическую систему с распределенными параметрами представить в виде дискретной динамической системы. Определение напряжений, возникающих в уплотняемой среде, позволит обосновать наиболее рациональные режимы вибрационного воздействия на уплотняемую среду, обеспечив при этом предельное разрушение её структурных связей и эффективное уплотнение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хархута Н.Я. Вопросы теории уплотнения дорожных покрытий // Сборник “Уплотнение земляного полотна и конструктивных слоев дорожных одежд”: Труды СоюздорНИИ. – М: СоюздорНИИ, 1980. – С. 48–53.
2. Костельов М.П. Уплотнению асфальтобетона требуется обновленное поколение дорожных катков // Каталог-справочник «Дорожная техника и технология». – 2003. – № 3. – С. 12–22.
3. Пермяков В.Б., Беляев К.В. Математическая модель процесса уплотнения асфальтобетонных смесей // Известия вузов. Строительство. – Новосибирск: НГАСУ, 2005. – Вып. 1. – С. 110–116.
4. Маслова Н.А. Исследование взаимодействия вибрационного рабочего органа с уплотняемой средой // Проблемы создания новых машин и технологий: науч. труды Кременчугского государственного политехнического института. – Кременчуг, 1997. – Вып. 2, част. 3. – С. 32–44.
5. Иткин А.Ф. Вибрационные машины для формирования бетонных изделий / А.Ф. Иткин – К.: «МП Леся», 2009. – 152 с.
6. Вибрационные машины для приготовления и уплотнения бетонных смесей / А.Г. Маслов, А.Ф. Иткин, Ю.С. Саленко. – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2014. – 324 с.
7. Вибрационные машины и процессы в дорожно-строительном производстве / А.Г. Маслов, Ю.С. Саленко. – Кременчуг: ПП Щербатых О.В., 2014. – 262 с.

STUDY OF THE INTERACTION OF THE VIBRATION PLATE WORKING BODY WITH SEALED MEDIUM

Zhanar Batsaikhan

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

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

The design scheme of the dynamical system "Vibrating working body - sealed medium" is compiled, in which the latter is presented in the form of distributed parameter system. As a result of the solution of the wave oscillations equation it is defined the deformation law of the sealed environment through the entire thickness of the compacted layer, depending on the increasing density under vibratory plates sealing mixture, its physical and mechanical characteristics, the thickness of the compacted layer weight compactors, frequency and amplitude of the perturbation-restoring force,

rigidity and internal damping coefficient of the elastic suspension. The changes in resistivity of the concrete sealing medium depending on its consistency are defined. The tensions in the sealing layer are calculated.

Key words: vibration plate, the interaction, the sealing medium, tension.

REFERENCES

1. Kharkhuta, N.Y., (1980), "Problems in the theory of pre-traveler's seal coating" , *Proc. Subgrade compaction and structural layers Soundtrack-governmental garments*, Soyuzdornii, Moscow, pp. 48–53.
2. Kostelyov, M.P., (2003), "Compaction of asphalt concrete requires an update generation rollers", *a directory "More Nye engineering and technology»*, no. 3, pp. 12–22.
3. Permiakov, V.B. Belyaev, K.V. (2005), "A mathematical model of the process of sealing asphalt mixes", *proceedings of the universities*, NSABU, Novosibirsk, vol. 1, pp. 110-116.
4. Maslova, N.A., (1997), "Investigation of the interaction of the vibration of the working body with sealing Wed-doy", *Problems of creation of new machines and technologies. Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, vol. 2, part 3, pp. 32–44.
5. Itkin, A.F., (2009), *Vibratsionnyie mashinyi dlya formovaniya betonnyih izdeliy* [Vibrating machines for molding concrete products], Les MP, Kyiv, Ukraine.
6. Maslov, A.G., Itkin, A.F., Salenko, Y.S., (2014), *Vibratsionnyie mashinyi dlya prigotovleniya i uplotneniya betonnyih smesey* [Vibrating machines for the preparation and compaction of concrete mixes], PP Cherbatyh, Kremenchug, Ukraine.
7. Maslov, A.G., Salenko, Y.S., (2014), *Vibratsionnyie mashinyi i protsessyi v dorozhno-stroitelnom proizvodstve* [Vibrating machines and processes in road construction industry], PP Cherbatyh, Kremenchug, Ukraine.

Стаття надійшла 23.01.2015.