

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛОСКОСТНОГО ГЛУБИННОГО ВИБРОУПЛОТНИТЕЛЯ С ПОЛУПРОСТРАНСТВОМ БЕТОННОЙ СМЕСИ

Жанар Батсайхан

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

Произведено преобразование комплексной функции, и получено аналитическое выражение, описывающего закон распространения упруго-вязко-пластических волн деформаций в явном виде при взаимодействии плоскостного виброуплотнителя колебаний с бетонной средой, представленной в виде полупространства. Получены аналитические выражения для определения приведенных значений жесткости, коэффициента неупругого сопротивления и массы уплотняемой бетонной смеси вибрационным воздействием. Определен закон изменений напряжений, возникающих в уплотняемом слое бетонной смеси при вибрационном воздействии плоскостным виброуплотнителем. Графически представлены и проанализированы изменения приведенных значений жесткости, коэффициента неупругого сопротивления и массы бетонных смесей различной консистенции, а также амплитуды колебаний глубинного плоскостного виброуплотнителя и амплитуды напряжений в бетонной среде в месте ее контакта с глубинным виброуплотнителем колебаний в зависимости от относительной плотности бетонной смеси и расстояния до источника вибрации. Приведены значения необходимой продолжительности вибрационного процесса уплотнения бетонных смесей различной консистенции в зависимости от длины обрабатываемого объема.

Ключевые слова: глубинный виброуплотнитель, бетонная смесь, взаимодействие.

РІШЕННЯ ЗАДАЧІ ВЗАЄМОДІЇ ПЛОЩИННОГО ГЛИБИННОГО ВІБРОУЩІЛЬНЮВАЧА З ПОЛУПРОСТРАНСТВОМ БЕТОННОЇ СУМІШІ

Жанар Батсайхан

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

Розглянуто математичний вираз, що описує в комплексній формі закон поширення коливань у ущільнюваному середовищі при взаємодії його з площинним вібраційним ущільнювачем. Запропоновано новий метод перетворення комплексної функції, та отримано аналітичний вираз, що описує закон поширення пружно-в'язко-пластичних хвиль деформацій в явному вигляді при взаємодії площинного виброуплотнителя коливань з бетонним середовищем, представленим у вигляді півпростору. Отримано аналітичні вирази для визначення приведеної жорсткості, наведеного коефіцієнта непружного опору і приведеної маси ущільнюваної бетонної суміші вібраційної дією. Визначено амплітуда коливань вертикально встановленої плити глибинного ущільнювача. Визначено закон зміни напружень, що виникають в ущільнюваному шарі бетонної суміші при вібраційній дії площинним виброуплотнителем. Визначено питомі значення приведеної жорсткості, приведеної маси і приведенного коефіцієнта непружного опору ущільнюваної бетонної суміші. Отримана формула для визначення в першому наближенні амплітуди напружень, що виникають по довжині ущільнюваного шару. Графічно показані зміни коефіцієнта приведеної жорсткості, наведеного коефіцієнта непружного опору і приведеної маси бетонних сумішей різної консистенції залежно від відносної щільності ущільнюваного середовища. Наведено технічні характеристики площинного глибинного ущільнювача, що використовується для ущільнення бетонних сумішей. Графічно представлено і проаналізовано зміни амплітуди коливань глибинного площинного виброуплотнителя і амплітуди напруг, що виникають у бетонному середовищі різної консистенції у місці його контакту з глибинним вібраційним ущільнювачем залежно від відносної щільності бетонної суміші. Показано зміну амплітуди коливань і амплітуди напруг у бетонному середовищі різної консистенції залежно від відстані до джерела вібрації. Наведені значення необхідної тривалості вібраційного процесу ущільнення бетонних сумішей різної консистенції залежно від довжини оброблюваного об'єму.

Ключові слова: глибинний віброущільнювач, бетонна суміш, взаємодія/

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Для обеспечения эффективной работы плоскостного глубинного уплотнителя необходимо с достаточной точностью выбрать его основные рациональные параметры и динамические режимы вибрационного воздействия на уплотняемую смесь, которую представляют реологической моделью в виде упругой модели Гука, вязкого тела Ньютона, упруго-вязкого тела Кельвина – Фогта или Максвелла [1–3]. Для изучения процессов, происходящих в уплотняемом материале, изучались динамические системы в которых уплотняемая среда была представлена в виде системы с распределенными параметрами [4–8]. Наиболее точные результаты дает реологическая модель, которая по-

зволяет определить упругие, инерционные, диссипативные силы и силы неупругого сопротивления, действующие со стороны уплотняемой смеси на вибрационный рабочий [9].

Цель работы – решение задачи взаимодействия плоскостного глубинного вибрационного уплотнителя с бетонной средой, позволяющее в явном виде определить закон колебаний динамической системы «вибрационный уплотнитель – бетонная среда», в которой последняя представлена в виде полупространства.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В работе [10] найден закон, описывающий распространения волн деформаций в бетонной среде

под действием гармонического возмущения в строго горизонтальном направлении, в виде комплексной функции:

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

где u и x – эйлера и лагранжева координаты; Q – амплитуда горизонтальной возмущающей силы; ω – угловая частота вынужденных вертикальных колебаний; t – время; E – динамический модуль упругой деформации бетонного слоя смеси; η – коэффициент динамической вязкости, учитывающий внутреннее трение в бетонной смеси; ρ – плотность бетонной смеси; L_1 – приведенная эффективная длина уплотняемого слоя бетонной смеси в направлении горизонтально оси X , $L_1 = 0,5\pi(E/\rho)^{0,5}/\omega$; μ – коэффициент сопротивления; F – площадь вертикальной плиты, контактирующая с уплотняемой бетонной смесью;

$$d = e^{\alpha L} [(\delta - \alpha) \cos kL + (k - \xi) \sin kL]; \quad (2)$$

$$\lambda = e^{\alpha L} [(\delta - \alpha) \sin kL - (k - \xi) \cos kL]; \quad (3)$$

$$M = e^{-\alpha L} [(\delta + \alpha) \cos kL + (k + \xi) \sin kL]; \quad (4)$$

$$N = e^{-\alpha L} [(\delta + \alpha) \sin kL - (k + \xi) \cos kL]; \quad (5)$$

где L – длина полуволны распространяемого в бетонной среде вибрационного возмущения, δ – коэффициент затухания возмущения в уплотняемом слое бетонной смеси, $\delta = (\mu + \rho L_1 \omega^2)/2E$; ξ – коэффициент диссипации, $\delta = (\mu + \rho L_1 \omega^2)/2E$; k и α – волновое число и коэффициент поглощения, характеризующий уменьшение амплитуды возмущения при удалении от источника вибрации:

$$k = \left[\frac{1}{2} (\rho \omega^2 / E + \xi^2 - \delta^2) + \sqrt{\frac{1}{4} (\rho \omega^2 / E + \xi^2 - \delta^2)^2 + \xi^2 \delta^2} \right]^{0,5}, \quad (6)$$

$$\alpha = \left[-\frac{1}{2} (\rho \omega^2 / E + \xi^2 - \delta^2) + \sqrt{\frac{1}{4} (\rho \omega^2 / E + \xi^2 - \delta^2)^2 + \xi^2 \delta^2} \right]^{0,5}. \quad (7)$$

Умножая числитель и знаменатель выражения $\frac{(d+M)+i(\lambda-N)}{(d-M)+i(\lambda+N)}$, стоящего в квадратных скобках в зависимости (7), на комплексное число сопряженное знаменателю, т.е. на $(d-M) - i(\lambda+N)$ и, преобразовывая в целом выражение, стоящее в квад-

ратных скобках знаменателя зависимости (7), получим

$$u(x,t) = Qe^{-\delta x} \frac{(d+i\lambda)e^{-(\alpha+ik)x} - (M-iN)e^{(\alpha+ik)x}}{(d-M)+i(\lambda+N)} \times \\ \times \frac{1}{[c_b - (m+m_b)\omega^2] - ib_b\omega} e^{i(\omega t - \xi x)} \quad (8)$$

где c_b – приведенная жесткость уплотняемой бетонной смеси,

$$c_b = EF \frac{\alpha(d^2 + \lambda^2) + 2k(dN + \lambda M)}{Z}; \quad (9)$$

где m_b – приведенная масса уплотняемой бетонной смеси,

$$m_b = EF\alpha \frac{M^2 + N^2}{Z\omega^2} + 0,5F \left(\frac{\mu}{\omega^2} + \rho L_1 \right); \quad (10)$$

b_b – приведенный коэффициент неупругого сопротивления уплотняемой бетонной смеси,

$$b_b = EF \frac{2\alpha(dN + \lambda M) - k(d^2 + \lambda^2 - M^2 - N^2)}{Z\omega} + EF \cdot \xi; \quad (11)$$

$$Z = (d-M)^2 + (\lambda+N)^2. \quad (12)$$

Умножим числитель и знаменатель выражения (8) на комплексные числа $[c_b - (m+m_b)\omega^2] + ib_b\omega$ и $(d-M) - i(\lambda+N)$, сопряженные комплексным числом, которые находятся в знаменателе и, выделяя из полученной зависимости мнимую часть образованной комплексной функции, а также преобразовывая её, получим искомое решение волнового уравнения, удовлетворяющее краевым условиям, в следующей форме:

$$u(x,t) = \frac{Q}{\sqrt{Z} \sqrt{[c_b - (m+m_b)\omega^2]^2 + b_b^2 \omega^2}} \times \\ \times \{ e^{-(\delta+\alpha)x} \sqrt{M^2 + N^2} [\cos(kx + \theta_1) \cos(\omega t - \xi x - \varphi) - \\ - \sin(kx + \theta_1) \sin(\omega t - \xi x - \varphi)] + e^{-(\delta-\alpha)x} \sqrt{\lambda^2 + d^2} \times \\ \times [\cos(kx + \theta_2) \cos(\omega t - \xi x - \varphi) + \\ + \sin(kx + \theta_2) \sin(\omega t - \xi x - \varphi)] \}, \quad (13)$$

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

$$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1; \quad (14)$$

$$\varphi_1 = \arctg \frac{b_b \omega}{c_b - (m+m_b)\omega^2}; \quad \varphi_2 = \arctg \frac{\lambda + N}{d - M}. \quad (15)$$

$$\theta_1 = \arctg \frac{M}{N}; \quad \theta_2 = \arctg \frac{d}{\lambda}.$$

Полученное решение (13) описывают в аналитической форме закон колебаний уплотняемого слоя бетонной смеси изучаемой динамической системы «глубинный уплотнитель – бетонная среда» в зависимости от координаты x , т.е. при $L \leq x \leq 0$. При $x = 0$ полученная зависимость описывает закон колебаний слоя смеси, прилегающего к вертикальной

плите, и одновременно закон колебаний плоскостного глубинного уплотнителя, т.е.

$$u(0, t) = A \sin(\omega t + \varphi_1), \quad (16)$$

где A – амплитуда колебаний вертикально установленной плиты глубинного уплотнителя,

$$A = \frac{Q}{\sqrt{[c_b - (m + m_b)\omega^2]^2 + b_b^2\omega^2}}. \quad (17)$$

Подставляя зависимость (13), описывающую закон колебаний рассматриваемой динамической системы, в уравнение

$$\sigma(x, t) = E \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} + \eta \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} - \rho L_1 \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} + \mu u(x, t), \quad (18)$$

определим изменение напряжений, возникающих в уплотняемом слое при действии вибрационного возмущения $Q \sin \omega t$:

$$\begin{aligned} \sigma(x, t) = & \left[AE \sqrt{(M^2 + N^2)[(k + \xi)^2 + (\delta + \alpha)^2} / \sqrt{Z} \right] \times \\ & \times e^{-(\delta + \alpha)x} [\cos(kx + \theta_1) \cos(\omega t - \xi x - \varphi + \varphi_3) - \\ & - \sin(kx + \theta_1) \sin(\omega t - \xi x - \varphi + \varphi_3)] + \\ & + \left[AE \sqrt{(\lambda^2 + d^2)[(k - \xi)^2 + (\delta - \alpha)^2} / \sqrt{Z} \right] \times \\ & \times e^{-(\delta - \alpha)x} [\cos(kx + \theta_2) \cos(\omega t - \xi x - \varphi - \varphi_4) + \\ & + \sin(kx + \theta_2) \sin(\omega t - \xi x - \varphi - \varphi_4)], \quad (19) \end{aligned}$$

где φ_3, φ_4 – углы сдвига фаз,

$$\varphi_3 = \arctg \frac{\alpha}{k}; \quad \varphi_4 = \arctg \frac{\eta \omega}{\mu + \rho L_1 \omega^2}. \quad (20)$$

Напряжения, возникающие в слое бетонной смеси в месте её контакта с вертикальной плитой, будут равны:

$$\begin{aligned} \sigma(0, t) = & \left[AE \sqrt{(M^2 + N^2)[(k + \xi)^2 + (\delta + \alpha)^2} / \sqrt{Z} \right] \times \\ & \times \cos(\omega t - \varphi + \varphi_3 + \theta_1) + \\ & + \left[AE \sqrt{(\lambda^2 + d^2)[(k - \xi)^2 + (\delta - \alpha)^2} / \sqrt{Z} \right] \times \\ & \times [\cos \theta_2 \cos(\omega t - \varphi - \varphi_4 - \theta_2)]. \quad (21) \end{aligned}$$

На рис. 1–3 показаны изменения коэффициента приведенной жесткости, приведенного коэффициента неупругого сопротивления и приведенной массы бетонных смесей различной консистенции в зависимости от относительной плотности уплотняемой среды. Приведенные данные получены при использовании теоретических зависимостей (9–11) для плоскостного глубинного уплотнителя, совершающего строго горизонтальные колебания в направлении координаты x , со следующими основными параметрами: масса глубинного уплотнителя – $m = 7$ кг; амплитуда возмущающей силы вибровозбудителя колебаний – $Q = 0,981$ кН; угловая частота вынужденных колебаний – $\omega = 292$ рад/с; площадь поверхности вертикальной плиты, взаимодействующая с бетонной смесью (при двухстороннем контакте) –

$F = 800$ см²; амплитуда колебаний вертикальной плиты в строго горизонтальном направлении, перпендикулярном плоскости взаимодействия вертикальной плиты с бетонной смесью, на холостом ходу (без взаимодействия с бетонной смесью) – $A = 0,167$ см.

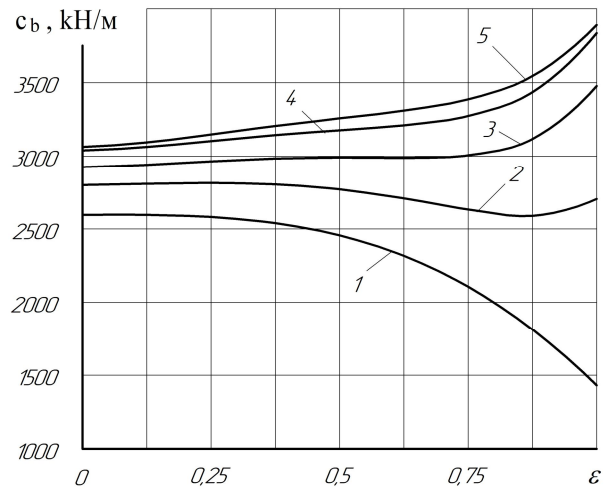


Рисунок 1 – Изменения коэффициента приведенной жесткости бетонных смесей c_b различной консистенции в зависимости от их относительной плотности $\varepsilon = (\rho - \rho_0) / \chi$: 1 – при осадке конуса 3,5 – 4 см (жесткость смеси $Ж = 6$ с); 2 – при $Ж = 30$ с; 3 – при $Ж = 60$ с; 4 – при $Ж = 90$ с; 5 – при $Ж = 120$ с

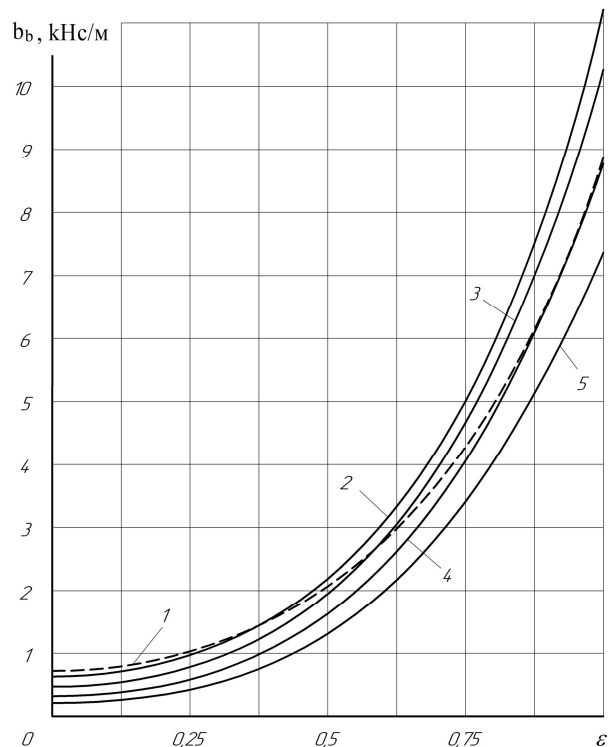


Рисунок 2 – Изменения коэффициента неупругого сопротивления бетонных смесей b_b различной консистенции в зависимости от их относительной плотности ε : 1 – при осадке конуса 3,5 – 4 см; 2 – при жесткости смеси $Ж = 30$ с; 3 – при $Ж = 60$ с; 4 – при $Ж = 90$ с; 5 – при $Ж = 120$ с

Анализ полученных зависимостей показывает, что значения приведенного коэффициента жесткости уплотняемой смеси имеют разнохарактерную направленность и зависят, как от относительной плотности бетонной смеси, так и от ее консистенции (рис. 1). С увеличением подвижности и относительной плотности для смесей с ОК 3,5 – 4 см наблюдается уменьшение их приведенного коэффициента жесткости.

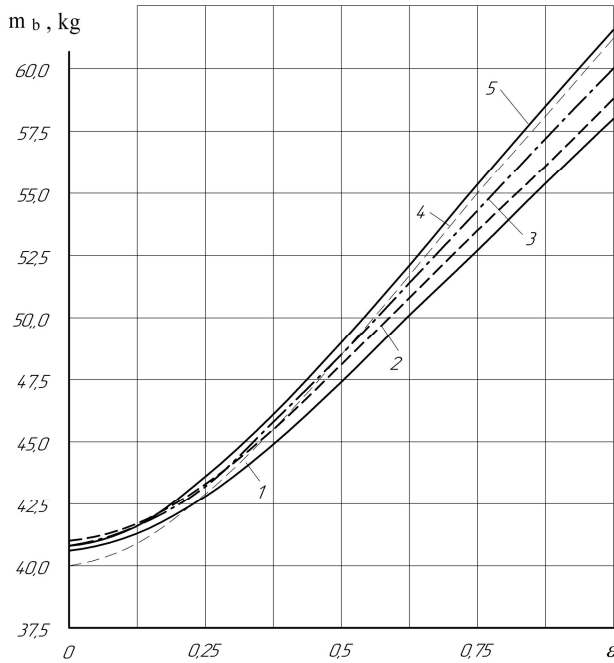


Рисунок 3 – Изменения приведенной массы бетонных смесей m_b различной консистенции в зависимости от их относительной плотности ϵ : 1 – при осадке конуса 3,5 – 4 см; 2 – при жесткости смеси Ж=30 с; 3 – при Ж=60 с; 4 – при Ж=90 с; 5 – при Ж=120 с

Это можно объяснить тем, что, при вибрационном воздействии на полупространство, с увеличением относительной плотности уплотняемой среды в колебательный процесс вовлекаются большие массы бетонной смеси за счет роста длины волны распространяемого возмущения и это препятствует росту приведенного коэффициента жесткости обрабатываемой среды не смотря на существенное увеличение динамического модуля упругой деформации смеси E .

Приведенный коэффициент неупругого коэффициента сопротивления бетонных смесей b_b существенно зависит от относительной плотности, а также от их консистенции. Приведенная масса m_b незначительно зависит от консистенции бетонной смеси, лишь сильно возрастает в процессе уплотнения с увеличением относительной плотности смеси ϵ . Таким образом, значения приведенных коэффициента жесткости, неупругого сопротивления и массы, определяющих взаимодействие глубинного плоскостного виброуплотнителя с бетонной средой, существенно зависят от консистенции, физико-

механических характеристик и относительной плотности бетонной смеси, краевых условий, частоты вибрационного воздействия и площади взаимодействия вертикальной плиты с уплотняемой бетонной средой. Эти параметры наряду с амплитудой возмущающей силой определяют амплитуду колебаний глубинного уплотнителя. После введения глубинного уплотнителя в обрабатываемую среду его амплитуда колебаний, которая составляет на холостом ходу 0,167 см, понижается и составляет в зависимости от консистенции смеси 0,0672 – 0,1044 см в начале уплотнения (рис. 4). Наибольшую амплитуду колебаний глубинный уплотнитель имеет при взаимодействии с бетонной средой, имеющей жесткость 120 с.

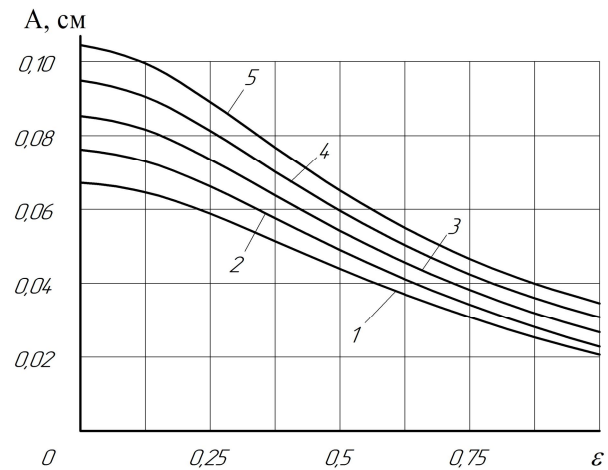


Рисунок 4 – Изменения амплитуды колебаний глубинного плоскостного виброуплотнителя при его взаимодействии с уплотняемой средой различной консистенции в зависимости от относительной плотности бетонной смеси: 1 – при осадке конуса 3,5 – 4 см; 2 – при жесткости смеси Ж=30 с; 3 – при Ж=60 с; 4 – при Ж=90 с; 5 – при Ж=120 с

По мере нарастания плотности бетонной среды амплитуда колебаний глубинного уплотнителя уменьшается и на заключительном этапе уплотнения составляет 0,0206 – 0,0346 мм, причем при увеличении жесткости бетонной смеси амплитуда колебаний имеет большие значения. Это объясняется тем, что по мере нарастания плотности бетонной смеси возрастает ее приведенная масса, вовлеченная в колебательный процесс, и увеличиваются диссипативные силы, которые обеспечивают поглощение энергии. Приведенное на рис. 5 возрастание напряжений, возникающих в бетонной смеси при ее контакте с поверхностью глубинного виброуплотнителя в процессе уплотнения, показывает, что в менее жестких смесях возникают меньшие напряжения, поскольку происходят колебания глубинного уплотнителя с меньшими амплитудами.

На рис. 6–7 показаны изменения амплитуд колебаний уплотняемой среды и напряжений в ней в зависимости от расстояния до источника вибрации. Именно эти показатели во многом определяют величину энергии, закачиваемой в бетонную среду

глубинным плоскостным виброуплотнителем, и позволяют определить нарастание плотности бетонной среды в процессе ее уплотнения вибрационным воздействием. Они также позволяют определить необходимую продолжительность вибрационного воздействия в зависимости от консистенции бетонной смеси и расстояния, на которое распространяются волны упругопластических деформаций, обеспечивающих необходимое уплотнение.

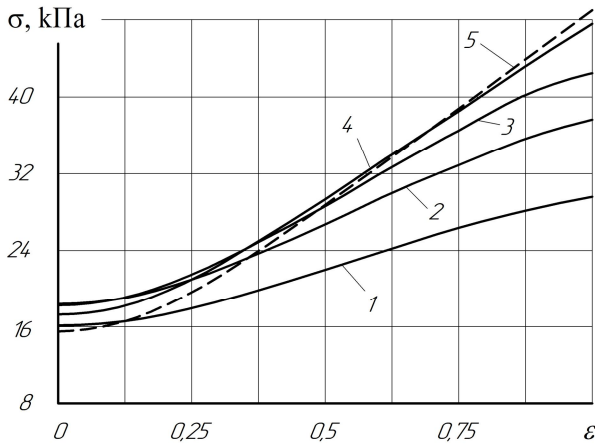


Рисунок 5 – Изменения амплитуды напряжений, возникающих в бетонной среде различной консистенции в месте ее контакта с глубинным виброуплотнителем колебаний в зависимости от относительной плотности бетонной смеси: 1 – при осадке конуса 3,5 – 4 см; 2 – при жесткости смеси Ж=30 с; 3 – при Ж=60 с; 4 – при Ж=90 с; 5 – при Ж=120 с

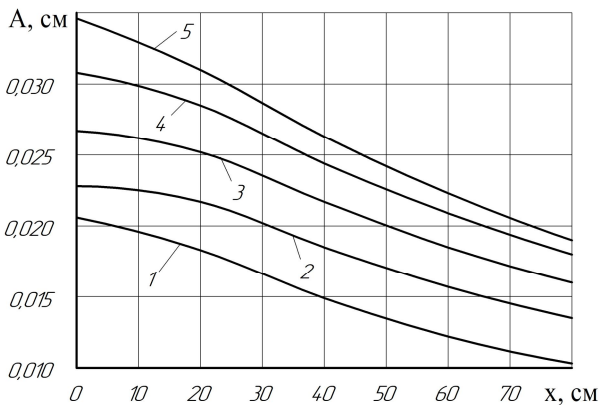


Рисунок 6 – Изменения амплитуды колебаний уплотняемой смеси различной консистенции в зависимости от расстояния до источника вибрации: 1 – при осадке конуса 3,5 – 4 см; 2 – при жесткости смеси Ж=30 с; 3 – при Ж=60 с; 4 – при Ж=90 с; 5 – при Ж=120 с

При этом должно быть выполнено условие, при котором напряжения, возникающие в уплотняемом слое должны превышать минимальные значения напряжений, обеспечивающих предельное разрушение структурных связей в бетонной среде, т.е.

$$\sigma(x) \geq \sigma_{0i}, \quad (22)$$

где $\sigma(x)$ – амплитуда напряжений, возникающих в уплотняемом слое в зависимости от координаты x ; σ_{0i} – величина минимальных напряжений, при которых обеспечивается предельное разрушение структурных связей в уплотняемой бетонной смеси, $\sigma_{0i}=10 - 12$ кПа ($0,1 - 0,12$ кг/см²).

Именно при разрушении структурных связей в бетонной смеси резко снижается её коэффициент внутреннего трения, из смеси удаляется воздух, увеличивается подвижность минеральных частиц и их переориентация с образованием более плотной упаковки.

При назначении интенсивности вибрационного воздействия необходимо учитывать технологические условия недопустимости расслаивания бетонной смеси в случае превышения продолжительности вибрирования пластичных смесей (с ОК=3,5 – 7 см) свыше 45 с. Обычно для этих смесей рекомендуется продолжительность вибрационного уплотнения равная 15 – 40 с. Для жестких бетонных смесей жесткостью от Ж=30 до Ж=180 с продолжительность уплотнения не должна быть более 120 – 180 с при их вибрировании в форме вертикально направленными колебаниями. При использовании глубинных уплотнителей, по нашему мнению, продолжительность уплотнения не должна превышать 60 – 90 с.

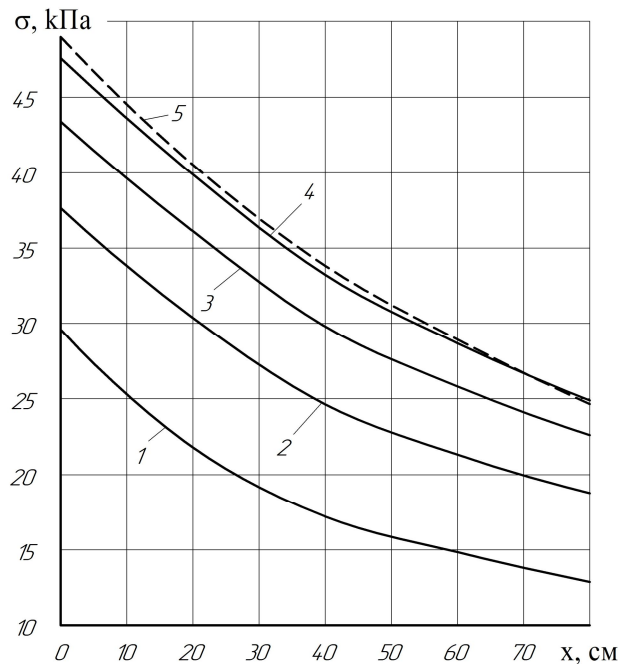


Рисунок 7 – Изменения амплитуды напряжений, возникающих в уплотняемой смеси различной консистенции в зависимости от расстояния до источника вибрации: 1 – при осадке конуса 3,5 – 4 см; 2 – при жесткости смеси Ж=30 с; 3 – при Ж=60 с; 4 – при Ж=90 с; 5 – при Ж=120 с

В табл. 1 представлены значения необходимой продолжительности уплотнения бетонных смесей различной консистенции в зависимости от длины вибрационной обработки. Анализ данных, приведенных в табл. 1 показывает, что пластичные и уме-

ренно жесткие бетонные смеси могут обрабатываться плоскостным глубинным виброуплотнителем с достаточно высокой производительностью. Неплохие результаты наблюдаются при уплотнении жестких бетонных смесей при длине обработки до 80 см, и удовлетворительные результаты – при длине обработки $x=100$ см.

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.

Таблица 1 – Значения необходимой продолжительности вибрационного процесса уплотнения t_v бетонных смесей различной консистенции в зависимости от длины обрабатываемого объема x

Консистенция бетонной смеси	Продолжительность вибрационного уплотнения, с		
	При $x = 60$ см	При $x = 80$ см	При $x = 100$ см
ОК=3,5–4 см	35	40	47
Ж=30 с	45	51	58
Ж=60 с	50	57	66
Ж=90 с	56	65	75
Ж=120 с	63	74	86

Примечание. При определении общего объема обработки величину x необходимо удвоить, т.к. вибрационная обработка осуществляется одновременно, как передней стенкой, так задней стенкой плоскостного виброуплотнителя

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.

INTERACTION OF PLANAR DEEP VIBROPLATES WITH HALF-SPACE OF CONCRETE MIX

Janar Batsaikhan

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

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

Purpose. To define the problem of interaction of planar deep vibrating compactor with a concrete medium, which allows to determine explicitly the law of vibrations of the dynamic system "vibrating compactor – concrete medium", in which the latter is represented as half-space. **Methodology.** As a result of the complex function transformation, analytical expression describing the law of propagation of elastic-visco-plastic deformation waves in an explicit form in the interaction of planar vibration absorber with a concrete medium, represented as half-space, is obtained. **Results.** Ana-

Приведенные зависимости позволяют обосновать рациональные параметры вибрационной машины и режимы вибрационного воздействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chen X., Wu S., Zhou J. Experimental study and analytical formulation of mechanical behavior of concrete. *Construction and Buildings Materials*. 2013. Vol. 47. P. 662–670.
2. 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. P. 932–941.
3. Hu C., Larrard F. The Rheology of Fresh High-Performance Concrete. *Cement and Concrete Research*. 1996. Vol. 26, № 2. P. 283–294.
4. Burlion N., Gatuingt F., Pijaudier-Cabot G., Daudeville L. Compaction and tensile damage in concrete: constitutive modelling and application to dynamics. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*. 2000. Issue (183), P. 291–308.
5. Meurer T., Qu J., Jacobs L.J. Wave propagation in nonlinear and hysteretic media - a numerical study. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*. 2002. Issue (39) P. 5585–5614.
6. Nagy N., Mohamed M., Boo J.C. Nonlinear numerical modelling for the effects of surface explosions on buried reinforced concrete structures. *Geomechanics and Engineering*. 2010. Vol. 2, No. 1, P. 1–18.
7. Маслов А. Г., Саленко Ю. С. Вибрационные машины и процессы в дорожно-строительном производстве: монография. Кременчук: ПП Щербатих О.В, 2014. 262 с.
8. 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), част. 1. С. 92–97.
9. 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), част. 1. С. 93–98.
10. Маслов А. Г., Жанар Батсайхан. Теоретические исследования взаимодействия плоскостного глубинного виброуплотнителя с бетонной смесью. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 2018. Вип. 2 (109), част. 1. С. 48–53.

lytical expressions for determination of the reduced rigidity, the reduced coefficient of inelastic resistance and the reduced mass of the compacted concrete mix by vibration influence are received. The vibration amplitude of a vertically mounted plate of a deep sealer is determined. The law of changes of stresses arising in the compacted layer of the concrete mixture under vibration action planar vibrator is defined. Specific values of reduced stiffness, reduced weight and reduced coefficient of inelastic resistance of compacted concrete mix are determined. Changes in the amplitude of vibrations of the deep plane vibration absorber and the amplitude of stresses arising in the concrete medium of different consistency at the point of its contact with the deep vibration absorber, depending on the relative density of the concrete mixture, are graphically presented and analyzed. The change of vibration amplitude and stress amplitude in the concrete medium of different consistency depending on the distance to the source of vibration is shown. **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. **Practical.** The obtained analytical dependences allow 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 10, tables 1, figures 7.

Key words: deep vibroflotation, concrete mixture, the interaction.

REFERENCES

1. 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.
2. 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.
3. Hu, C., Larrard, F. (1996), The Rheology of Fresh High-Performance Concrete," *Cement and Concrete Research*, V. 26, No. 2, pp. 283-294.
4. Burlion, N., Gatuingt, F., Pijaudier-Cabot, G., Daudeville, L. (2000), Compaction and tensile damage in concrete: constitutive modelling and application to dynamics. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. Issue (183)*, pp. 291 – 308.
5. Meurer, T., Qu, J., Jacobs, L. J. (2002), Wave propagation in nonlinear and hysteretic media - a numerical study. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. Issue (39)* pp 5585–5614.
6. Nagy, N., Mohamed, M., Boo, J. C. (2010), Nonlinear numerical modelling for the effects of surface explosions on buried reinforced concrete structures. *Geomechanics and Engineering, Vol. 2, No. 1*, pp 1-18. DOI: 10.12989/gae.2010.2.1.001.
7. Maslov, A. G., Salenko, Y. S. (2014), *Vibratsionnyye mashiny i protsessy v dorozhno-stroitel'nom proizvodstve* [Vibrating machines and processes in road construction industry: *monography*], Cherbatyh, Kremenchuk, Ukraine.
8. Maslov, A. G., Batsaikhan, Zhanar (2015), "The Research of oscillations of the machine working body of the for compaction of concrete mixes in vibration working mode", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. Kremenchug: KRNU, Issue (91)*, pp. 92 – 97.
9. 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. Kremenchug: KRNU, Issue (67)*, pp. 93 – 98.
10. Maslov, A.G., Batsaikhan, Zhanar (2018), "Theoretical studies of the interaction of planar deep vibroplates with concrete mixture", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. Kremenchug: KRNU, Issue (109)*.

Стаття надійшла 26.03.2018.