

УДК 666.97.033.16

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО РЕЖИМА ВИБРАЦИОННОГО ПРИГРУЗА ДЛЯ ФОРМОВАНИЯ ПЛОСКИХ ИЗДЕЛИЙ

**Иткин А.Ф., к.т.н., генеральный директор
ИТЭСУ «Нефтегазстройизоляция», г. Киев**

Маслов А.Г., д.т.н., проф.

Кременчугский государственный политехнический университет

39614, г.Кременчуг, ул.Первомайская, 20

E-mail: kmto@polytech.poltava.ua

В данной статье наведены результаты теоретических и экспериментальных исследований вибрационного привантажу, использованного для формирования плоских вибробетонных изделий из жестких цементных бетонных смесей. Выявлены рациональные параметры вибрационного привантажу и режимы его вибрационной нагрузки на уплотняемую смесь.

Ключевые слова: вибрационный привантажу, вибрационная нагрузка, бетонная смесь

Results of theoretical and experimental researches of vibration load used for shaping flat wares from the hard cement concrete mixtures are led In this article. Rational parameters of vibration load and modes of his vibration influence on the made more compact mixture are definite.

Key words: vibration load, vibration influence, concrete mixture

Введение. Создание вибрационного пригруза, обеспечивающего эффективное уплотнение жестких цементобетонных смесей, сочетающего в себе высокие показатели производительности и качества формируемого изделия с его простотой конструкции и сравнительно малыми значениями металлоемкости и энергоемкости является важной народнохозяйственной задачей.

Анализ предшествующих исследований. В настоящее время отсутствуют научно обоснованные методы расчета вибрационных пригрузов, используемых для формирования изделий из жестких цементобетонных смесей.

Цель работы. Исследование рабочего режима вибрационного пригруза и определение его рациональных параметров и режимов вибрационного воздействия при формировании плоских изделий из жестких цементобетонных смесей.

Материал и результаты исследований. Установка для формирования плоских бетонных и железобетонных изделий с использованием вибрационного пригруза (рис.1) состоит из виброплощадки, выполненной в виде подвижной рамы 1, которая при помощи упругих опор 2 установлена на фундаментной опоре 3. Виброплощадка снабжена вибровозбудителем горизонтальных круговых колебаний 4, который соединен с приводным электродвигателем 5 при помощи клиноременной передачи. На подвижной раме 1 закреплена форма 6 с бетонной смесью. Вибрационный пригруз 7 установлен на поверхности уплотняемой смеси и снабжен двумя вибровозбудителями круговых колебаний 8, имеющих противоположное направление вращения и генерирующих вертикально направленные колебания.

Рассмотрим рабочий режим вибрационного пригруза при выключенной виброплощадке. При этом подвижную раму виброплощадки вместе с установленной на ней формой будем считать абсо-

лютно жестким телом из-за их большой массы по сравнению с массой вибрационного пригруза.

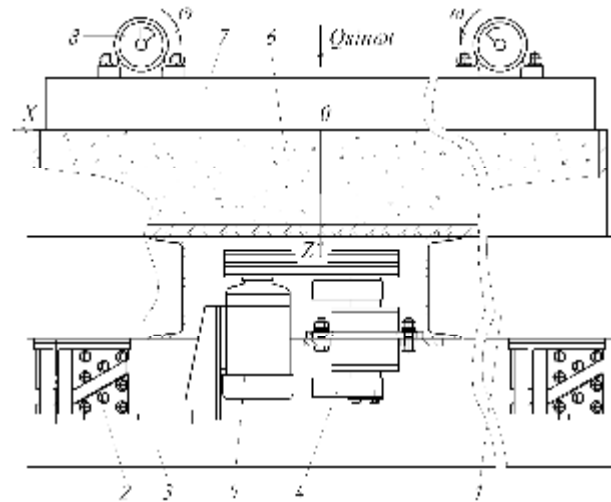


Рисунок 1 – Схема вибрационной установки с пригрузом для формирования бетонных и железобетонных изделий

Для определения закона движения и характера взаимодействия вибрационного пригруза с обрабатываемой цементобетонной средой в вертикальном направлении исследуем динамическую систему "вибрационный пригруз - цементобетонная среда" (рис.1), в которой уплотняемая смесь представлена в виде системы с распределенными параметрами [1]. На вибрационный пригруз действует возмущение в виде вертикально направленной гармонической силы $Q \sin \omega t$. Рассмотрим безотрывный режим работы вибрационного пригруза от уплотняемой среды.

Дифференциальное уравнение движения уплотняемой смеси в направлении координаты z за время t можно описать уравнением

$$E \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2} + h \frac{\partial^3 u(z,t)}{\partial z^2 \partial t} = r \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где u и z – эйлерова и лагранжева координаты; E и h – динамический модуль упругой деформации и коэффициент неупругого сопротивления уплотняемой цементобетонной смеси; r – плотность цементобетонной смеси.

Решение волнового уравнения колебаний (1) будем отыскивать при следующих граничных условиях

$$-m_{np} \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial t^2} + EF \frac{\partial u(0,t)}{\partial z} + hF \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial z \partial t} = -Q \sin(\omega t), \quad (2)$$

$$u(H,t) = 0, \quad (3)$$

где m_{np} – масса вибрационного пригруза; Q – амплитуда возмущающей силы вибровозбудителей колебаний; ω – угловая частота вынужденных колебаний; F – опорная площадь вибрационного пригруза, контактирующая с цементобетонной смесью; H – высота обрабатываемого слоя смеси.

Решение уравнения (1), удовлетворяющего граничным условиям (2) и (3), представим в виде

$$u(z,t) = [B e^{-(a+ik)z} + D e^{(a+ik)z}] e^{i\omega t}, \quad (4)$$

где B и D – постоянные интегрирования (комплексные амплитуды), определяемые из граничных условий (2) и (3).

Значения волнового числа $k = \omega/a$, коэффициента затухания возмущения a и фазовой скорости распространения возмущения в уплотняемом слое [1].

Подставляя выражение (4) в граничное условие (3), найдем соотношение между постоянными интегрирования B и D :

$$D = -B \frac{e^{-(a+ik)H}}{e^{(a+ik)H}}. \quad (5)$$

На основании выражения (5) в решение (4) преобразуется к следующему виду

$$u(z,t) = B \frac{e^{(a+ik)(H-z)} - e^{-(a+ik)(H-z)}}{e^{(a+ik)H}} e^{i\omega t}. \quad (6)$$

Подставляя выражение (6) в граничное условие (2), найдем постоянную интегрирования B в следующем виде:

$$B = \frac{Q e^{(a+ik)H}}{2sh[(a+ik)H] \{ [c_1 - (m_{\delta} + m_{np})W^2] + ib_1 w \}}, \quad (7)$$

где c_1 – коэффициент упругой деформации цементобетонной смеси,

$$c_1 = \frac{F[aE \cdot sh2aH + (kE + ahw) \sin 2kH]}{2(sh^2 aH + \sin^2 kH)}; \quad (8)$$

m_{δ} – приведенная масса цементобетонной смеси,

$$m_{\delta} = \frac{Fkh \cdot sh2aH}{2w(sh^2 aH + \sin^2 kH)}; \quad (9)$$

b_1 – коэффициент неупругого сопротивления цементобетонной смеси,

$$b_1 = \frac{F[(kE + ahw)sh2aH - (aE - khw) \sin 2kH]}{2w(sh^2 aH + \sin^2 kH)}. \quad (10)$$

На основании выражений (5) и (7) постоянная интегрирования D будет иметь следующий вид:

$$D = -\frac{e^{-(a+ik)H}}{2sh[(a+ik)H]} \times \frac{Q}{[c_1 - (m_{\delta} + m_{np})W^2] + ib_1 w}. \quad (11)$$

При подстановке постоянных интегрирования B и D в выражение (4), получим решение уравнения (1) в комплексной форме, т.е.

$$u(z,t) = \frac{Q \cdot sh[(a+ik)(H-z)]}{sh[(a+ik)H]} \times \frac{e^{i\omega t}}{[c_1 - (m_{\delta} + m_{np})W^2] + ib_1 w}. \quad (12)$$

Представляя значения элементов $sh(a+ik)H$, $sh[(a+ik)(H-z)]$

в виде

$$sh(a+ik)H = shaH \cos kH + ichaH \sin kH \quad \text{и} \\ sh[(a+ik)(H-z)] = sha(H-z) \cos k(H-z) + \\ + icha(H-z) \sin k(H-z),$$

подставим их значение в зависимость (12) и, выделяя из полученного выражения мнимую часть комплексной функции, получим искомое решение уравнения (1), удовлетворяющее граничным условиям (2) и (3), в следующем виде:

$$u(z,t) = \frac{Q}{\sqrt{[c_1 - (m_{\delta} + m_{np})W^2]^2 + b_1^2 W^2}} \times \\ \times \frac{1}{\sqrt{sh^2 aH \cos^2 kH + ch^2 aH \sin^2 kH}} \times \\ \times [sha(H-z) \cos k(H-z) \sin(\omega t - j_1) + \\ + cha(H-z) \sin k(H-z) \cos(\omega t - j_1)], \quad (13)$$

где

$$j_1 = -\arctg \frac{b_1 w}{c_1 - (m_{np} + m_{\delta})W^2} + \\ + \arctg \frac{chaH \sin kH}{shaH \cos kH}. \quad (14)$$

Полученное выражение (13) описывает закон движения как вибрационного пригруза при $z=0$, так и уплотняемого слоя цементобетонной смеси при $z>0$.

После несложных преобразований выражения (13) получим зависимость, удобную для анализа и моделирования на ПЭВМ:

$$u(z,t) = \frac{Q}{\sqrt{[c_1 - (m_0 + m_{np})w^2]^2 + b_1^2 w^2}} \times \frac{1}{\sqrt{sh^2 aH \cos^2 kH + ch^2 aH \sin^2 kH}} \times [sh^2 a(H-z) \cos^2 k(H-z) + ch^2 a(H-z) \sin^2 k(H-z)]^{0.5} \times \sin[\omega t - j_1 + X_1(z)], \quad (15)$$

где

$$X_1(z) = \arctg \frac{cha(H-z) \sin k(H-z)}{sha(H-z) \cos k(H-z)}. \quad (16)$$

После дальнейшего преобразования выражения (15) получим

$$u(z,t) = \frac{Q}{\sqrt{[c_1 - (m_0 + m_{np})w^2]^2 + b_1^2 w^2}} \times \sqrt{\frac{ch2a(H-z) - \cos 2k(H-z)}{ch2aH - \cos 2kH}} \times \sin[\omega t - j_1 + X_1(z)]. \quad (17)$$

При $z=0$ выражение (17) описывает закон колебаний вибрационного пригруза, т.е.

$$u(0,t) = \frac{Q}{\sqrt{[c_1 - (m_0 + m_{np})w^2]^2 + b_1^2 w^2}} \times \sin(\omega t - j_1) = A \sin(\omega t - j_1), \quad (18)$$

где A - амплитуда колебаний вибрационного пригруза,

$$A = \frac{Q}{\sqrt{[c_1 - (m_0 + m_{np})w^2]^2 + b_1^2 w^2}}. \quad (19)$$

На основании выражений (18) и (15) закон движения рассматриваемой динамической системы можно представить в следующем виде:

$$u(z,t) = A \sqrt{\frac{ch2a(H-z) - \cos 2k(H-z)}{ch2aH - \cos 2kH}} \times \sin[\omega t - j_1 + X_1(z)]. \quad (20)$$

Коэффициент динамической вязкости h , используемый в выше приведенных выражениях, может быть определен для поверхностного вибрационного воздействия из зависимости

$$h = 0,7ar H_1, \quad (21)$$

где a - скорость распространения волны деформаций в уплотняемом слое, которая в первом приближении может быть определена из выражения

$a = \sqrt{E/r}$; H_1 - расчетная толщина уплотняемого цементобетонного слоя, принимаемая в зависимости от соотношения толщины уплотняемого слоя H и длины волны возмущения

$$L_e = \frac{2p}{w} \sqrt{E/r};$$

- если толщина уплотняемого слоя

$$H \leq \frac{1}{4} L_e = \frac{p}{2w} \sqrt{E/r}, \text{ то } H_1 = H;$$

$$\text{- если } H > \frac{1}{4} L_e, \text{ то } H_1 = \frac{1}{4} L_e = \frac{p}{2w} \sqrt{E/r}.$$

Напряжения, возникающие в уплотняемом слое цементобетонной смеси от действия вибрационного пригруза, определяются при подстановке выражения (13) в следующую зависимость:

$$S_1(z,t) = E \frac{\partial u(z,t)}{\partial x} + h \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial x \partial t}. \quad (22)$$

Тогда

$$S_1(z,t) = - \frac{Q \sqrt{(k^2 + a^2)(E^2 + h^2 w^2)}}{\sqrt{[c_1 - (m_0 + m_{np})w^2]^2 + b_1^2 w^2}} \times \frac{1}{sh^2 aH \cos^2 kH + ch^2 aH \sin^2 kH} \times [sh^2 aH \cos^2 kH + ch^2 aH \sin^2 kH + sh^2 a(H-z) \sin^2 k(H-z)]^{0.5} \times \cos[\omega t - j_1 + X_2(z)], \quad (23)$$

где

$$j_2(z) = -\arctg \frac{a}{k} + \arctg \frac{hw}{E} + \arctg \frac{sha(H-z) \sin k(H-z)}{cha(H-z) \cos k(H-z)}. \quad (24)$$

С учетом зависимостей (15), (17) и (19) выражение (23) для определения напряжений в уплотняемом слое цементобетонной смеси преобразуется к следующему виду:

$$S_1(z,t) = -A \sqrt{(k^2 + a^2)(E^2 + h^2 w^2)} \times \sqrt{\frac{ch2a(H-z) + \cos 2k(H-z)}{ch2aH - \cos 2kH}} \times \cos[\omega t - j_1 + X_2(z)]. \quad (25)$$

Средние напряжения, возникающие в уплотняемом слое цементобетонной смеси от действия вибрационного пригруза, определяются из следующего выражения:

$$S_{cp} = \frac{1}{H} \int_0^H S_1(z,t) dz. \quad (26)$$

Полученные зависимости (8 – 10), (18 – 20) и (25) удобно использовать при исследовании многомассных динамических систем.

На основании выполненных исследований были проведены работы по созданию вибрационного пригруза для формирования дорожных плит с геометрическими размерами в плане $L=6000$ мм $B=2000$ мм и толщиной $H=140, 170$ и 200 мм. Для возбуждения вертикально направленных колебаний были выбраны два электромеханических вибратора Ярославского завода «Красный маяк» ИВ-107А-П со следующей технической характеристикой: частота колебаний - 2850 кол/мин; амплитуда возмущающей силы - 18,15 кН (1850 кг); мощность - 1,5

кВт; масса - 40 кг. Для установления рациональных параметров вибрационного пригруза определялась эффективность уплотнения цементобетонной смеси при его статическом давлении на поверхность уложенной смеси $q = 1,0, 1,5$ и 2 кПа, т.е. соответственно при массе вибрационного пригруза $m_{np} = 1200, 1800$ и 2400 кг. Было учтено, что вибрационный пригруз целесообразно использовать после определенного времени вибрирования на виброплощадке, когда смесь осела и разравнялась, т.е. достигла коэффициента уплотнения $0,983 - 0,988$, что соответствует коэффициенту относительной пластической деформации цементобетонной смеси $x = r_k(r - r_0) / [r(r_k - r_0)] = 0,94$. При использовании двухчастотной виброплощадки с пространственными (продольно-вертикальными) колебаниями, значения коэффициента относительной пластической деформации цементобетонной смеси $x = 0,94$ можно достичь при вибрировании цементобетонной смеси жесткостью 30 с в течение $20 - 24$ с, смеси жесткостью 60 с при вибрировании в течение $40 - 50$ с, а смеси жесткостью 90 с в течение $65 - 80$ с. Эти данные получены при формировании изделий толщиной $140, 170$ и 200 мм, причем меньшие значения продолжительности вибрирования цементобетонной смеси соответствуют толщине слоя 200 мм, а большие значения толщине слоя 140 мм.

Используя зависимости (17 – 26) были определены законы движения вибрационного пригруза и уплотняемой среды, напряженно деформированное состояние уплотняемой среды, требуемая продолжительность вибрационного воздействия в зависимости от интенсивности вибрационного воздействия, консистенции смеси, толщины уплотняемого слоя и массы вибрационного пригруза.

В таблице 1 приведены значения необходимой продолжительности вибрационного воздействия вибрационным пригрузом на цементобетонную смесь до ее требуемого уплотнения в зависимости от толщины уплотняемого слоя, консистенции смеси и от удельного статического давления пригруза на поверхность смеси при амплитуде возмущающих сил вибровозбудителей колебаний $36,3$ кПа и частоте колебаний 2850 кол/мин. Из приведенных данных следует, что рациональным при формировании бетонных изделий является использование вибрационного пригруза с массой, величина которой определяется удельным статическим давлением $q = 1,5 - 2$ кПа, и двух вибровозбудителей колебаний с общей удельной амплитудой вынужденных сил $3,0$ кН/м². Именно при этих значениях обеспечивается наиболее эффективное уплотняющее воздействие на цементобетонную смесь, а также достигается создание достаточно жесткой, практически не деформируемой конструкции пригруза, обеспечивающей создание ровной поверхности формируемого изделия.

На рис. 2 и 3 показано изменение амплитуды колебаний $A(z)$ динамической системы и напряжений в уплотняемом слое $S(z)$ в зависимости от относительной координаты z/H , консистенции смеси и толщины уплотняемого слоя на заключительной стадии процесса уплотнения при $q = 2$ кПа.

**Таблица 1 –
Изменение продолжительности вибрационного воздействия вибропригрузом на уплотняемую цементобетонную смесь в зависимости от ее консистенции, толщины уплотняемого слоя и удельного статического давления пригруза**

№ п/п	Консистенция смеси, с	Толщина слоя, мм	Удельное давление пригруза q , кПа		
			1,0	1,5	2,0
1	30	140	26	24	21
2		170	27	24	21
3		200	28	25	22
4	60	140	44	39	34
5		170	45	40	34
6		200	48	42	37
7	90	140	56	48	41
8		170	58	50	42
9		200	62	54	47

Анализ приведенных данных показывает, что амплитуда деформаций уплотняемого слоя $A(z)$ при толщине от 140 до 200 мм изменяется почти по линейному закону от $A = A(0)$ (амплитуда колебаний вибрационного пригруза) до нуля. Амплитуда колебаний вибрационного пригруза A возрастает с увеличением жесткости смеси и снижается с уменьшением толщины уплотняемого слоя.

Амплитуда напряжений (рис.3), возникающих в уплотняемом слое, уменьшается по некоторому экспоненциальному закону с увеличением координаты z , причем уменьшается более интенсивно с увеличением толщины уплотняемого слоя. Однако, влияющая на эффективность процесса уплотнения амплитуда средних напряжений S_{cp} изменяется не значительно для указанного диапазона толщин уплотняемого слоя, особенно с увеличением удельного статического давления пригруза до $q = 2$ кПа. О чем свидетельствуют показатели, приведенные в таблице 1.

Анализ данных, приведенных в таблице 1 и рис. 2 и 3, показывает, что применение на заключительной стадии процесса уплотнения вибрационного пригруза позволяет не только выровнять и получить качественную поверхность, но и значительно уменьшить энергоемкость процесса уплотнения. Например, для формирования дорожных плит размером $6000 \times 2000 \times 200$ (мм) используется двухчастотная виброплощадка с пространственными колебаниями мощностью 30 кВт, которая осуществляет предварительное уплотнение в течение $40 - 80$ с

при формировании жестких цементобетонных смесей жесткостью 60 – 90 с.

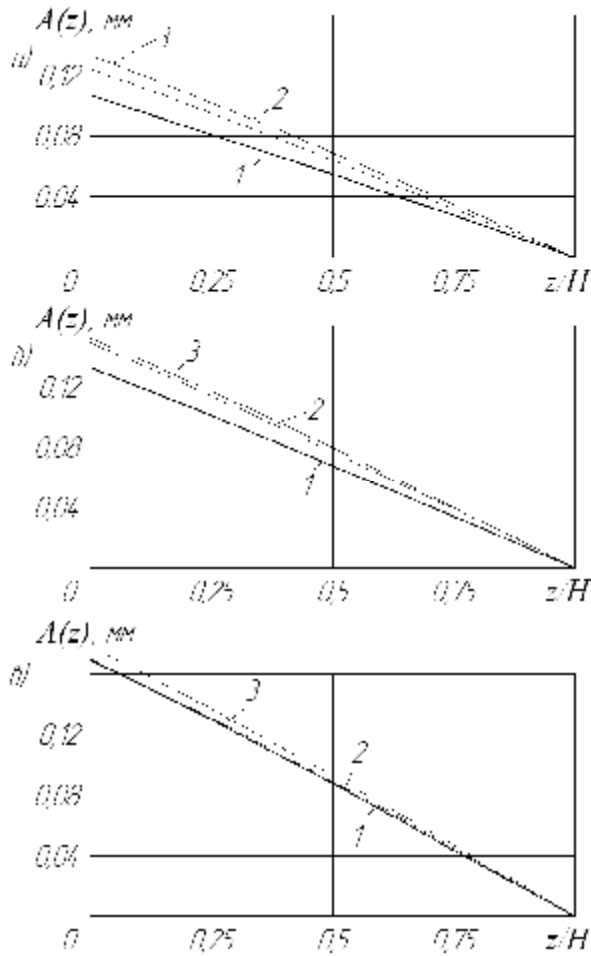


Рисунок 2 – Изменение амплитуды колебаний $A(z)$ динамической системы в зависимости от относительной координаты z/H на заключительной стадии процесса уплотнения при удельном статическом давлении вибропригруза $q=2$ кПа: а) для жесткости смеси $Ж=30$ с; б) для $Ж=60$ с; в) для $Ж=90$ с; 1 – при толщине слоя $H=140$ мм; 2 – при $H=170$ мм; 3 – при $H=200$ мм

Заключительная стадия процесса уплотнения (самая ответственная и продолжительная) осуществляется вибрационным пригрузом массой 2400 кг, имеющим сравнительно небольшую амплитуду колебаний и мощность привода возбудителей колебаний 3 кВт. При этом сокращение почти в два раза необходимой продолжительности работы виброплощадки позволяет не менее чем в два раза увеличивается срок службы дорогостоящих вибровозбудителей колебаний, а также металлоконструкций подвижной рамы виброплощадки, испытывающих усталостное разрушение от действия вибрационных нагрузок.

Таким образом, применение на заключительной стадии процесса уплотнения вибрационного пригруза с правильно подобранными параметрами позволяют обеспечить качественное формирование цементобетонных изделий, уменьшить энергоем-

кость процесса уплотнения и продлить срок службы виброплощадки.

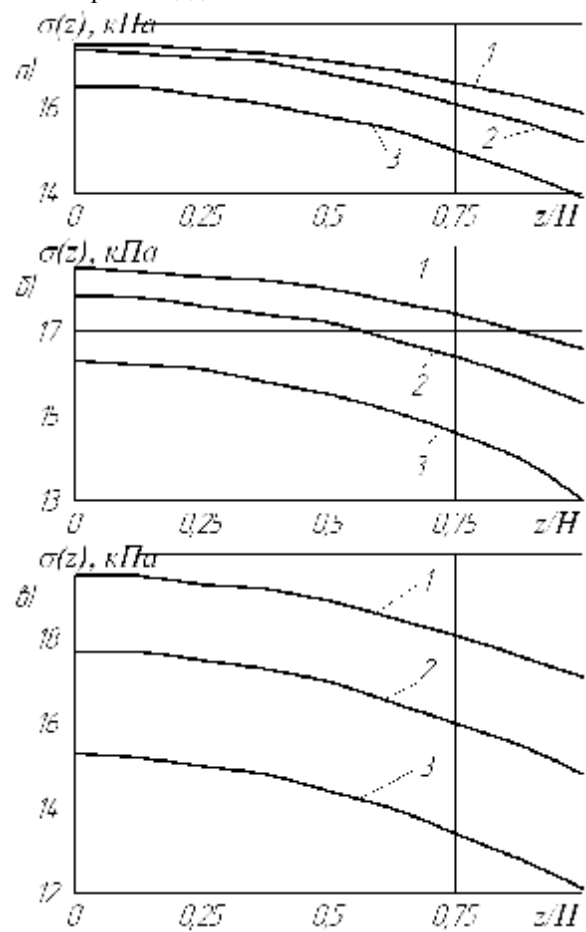


Рисунок 3 – Изменение амплитуды напряжений в уплотняемом слое $\sigma(z)$ в зависимости от относительной координаты z/H на заключительной стадии процесса уплотнения при удельном статическом давлении вибропригруза $q=2$ кПа: а) для жесткости смеси $Ж=30$ с; б) для $Ж=60$ с; в) для $Ж=90$ с; 1 – при толщине слоя $H=140$ мм; 2 – при $H=170$ мм; 3 – при $H=200$ мм

Выводы. Изучен процесс взаимодействия вибрационного пригруза с уплотняемой средой, представленной в виде системы с распределенными параметрами. Установлено, что наиболее эффективным на заключительной стадии процесса уплотнения цементобетонных изделий является использование вибрационного пригруза с удельным статическим давлением $q=1,5...2$ кПа и удельной амплитудой вынужденных сил $3,0$ кН/м² при угловой частоте колебаний 299 рад/с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

1. Маслов А.Г., Иткин А.Ф. Теоретические основы вибрационного уплотнения цементобетонных смесей. // Вісник КДПУ, вип. 5/2004 (28). – Кременчук, 2004. – С. 45 – 49.

Статья поступила 05.02.2007 г.
Рекомендована к печати д.т.н., проф.
Солтусом А.П.