

ТЕОРЕТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ НАПРУЖЕНЬ, ЯКІ ВИНИКАЮТЬ У ПОЛІМЕРНОМУ БЕТОНІ ПРИ ЙОГО УЩІЛЬНЕННІ ВІБРАЦІЙНОЮ ПЛИТОЮ

О. Г. Маслов, Д. В. Савєлов

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

ORCID: 0000-0002-8860-2035; 0000-0002-5170-9621

Для теоретичного визначення напружено-деформованого стану ущільнюваного вібраційною плитою полімерного бетону виконано дослідження динамічної системи «вібраційна плита – полімерний бетон», в якій ущільнюваний вібраційним навантаженням полімерний бетон уявлено у вигляді системи з розподіленими параметрами. У результаті дослідження динамічної системи «вібраційна плита – полімерний бетон» отримано теоретичні вирази для визначення фізико-механічних характеристик полімерного бетону, руху вібраційної плити поверхневого ущільнювача у робочому режимі та напружень, які виникають в ущільнюваному шарі полімерного бетону. Отримані закономірності дозволяють визначати зміни напружень в основі та на поверхні шару полімерного бетону, який деформується вібраційною плитою. За отриманими теоретичними залежностями побудовано графіки, які наочно ілюструють зміни амплітуди коливань вібраційної плити поверхневого ущільнювача залежно від висоти виробу та напружень, що виникають в основі та на поверхні ущільнюваного шару полімерного бетону. У результаті аналізу кривих зміни амплітуди коливань вібраційної плити виявлено основні режими коливань вібраційної плити, що реалізуються під час робочого режиму ущільнення полімерного бетону поверхневим робочим органом залежно від відносної щільності.

Ключові слова: вібраційна плита, полімерний бетон, коливання, напруження, деформація.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. При поверхневому ущільненні полімерного бетону вібраційним способом відбувається взаємодія вібраційної плити робочого органу з ущільнюваним середовищем. При цьому фізико-механічні характеристики ущільнюваного полімерного бетону чинять істотний вплив на поведінку динамічної системи вібраційного обладнання і вибір його основних робочих параметрів. Визначення фізико-механічних характеристик ущільнюваного полімерного бетону дозволить встановити раціональний закон руху вібраційної плити, що взаємодіє з полімерним бетоном, оцінити режими роботи вібраційної плити, визначити характер зміни напружень, що виникають у шарах полімерного бетону при його деформуванні вібраційним навантаженням та правильно підібрати технологічні параметри вібраційного впливу, застосування яких забезпечить ефективне ущільнення полімерного бетону в цілому.

На сьогоднішній день проведено багато дослідження щодо вибору режимів вібраційної обробки [1 – 4] та впливу вібраційних робочих органів на характеристики ущільнюваного середовища. У роботах [5, 6] складено розрахункову схему динамічної системи «вібраційна плита – полімерний бетон», у якій полімерний бетон уявлено у вигляді системи з розподіленими параметрами, що враховує пружні і в'язкі його властивості (рис. 1). При цьому фізико-механічні характеристики ущільнюваного полімербетонного середовища представлені реологічною моделлю Зінера, яка разом із оборотною і незворотною деформацією описує оборотну високоеластичну деформацію, яка найбільш наочно виявляється у середовищі, до складу яких входять полімери.

В результаті проведених теоретичних досліджень отримані аналітичні вирази для визначення динамічних модулів пружної деформації і коефіцієнта динамічної в'язкості полімерного бетону, закону руху вібраційної плити і полімерного бетону залежно від

його фізико-механічних характеристик, амплітуди і частоти вимушених коливань і висоти ущільнюваних шарів [6].

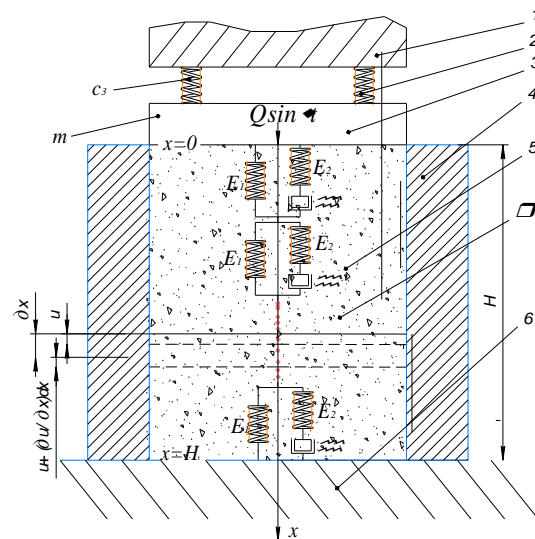


Рисунок 1 – Розрахункова схема динамічної системи «вібраційна плита – полімерний бетон» [5, 6]:

- 1-опорна рама; 2-пружний амортизатор;
- 3-вібраційна плита; 4-форма; 5-полімерний бетон;
- 6-основа

Однак у зазначених роботах [1 – 6] не визначені закономірності зміни напружень, які виникають у шарах виробу з полімерного бетону при дії вібраційного навантаження.

Тому проведення подальших теоретичних досліджень, спрямованих на аналітичне визначення закономірностей зміни напружень, що виникають у шарах полімербетонного виробу при ущільненні поверхневим вібраційним ущільнювачем та уточнення режимів вібраційного впливу залежно від фізико-механічних характеристик ущільнюваного матеріалу і розміру виробів є досить актуальним завданням.

Метою цих досліджень є теоретичне визначення закономірностей зміни напружень, які виникають у шарах полімерного бетону його ущільненні поверхневим вібраційним ущільнювачем.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Відповідно до запропонованої розрахункової схеми динамічної системи «вібраційна плита – полімерний бетон» та реологічної моделі полімерного бетону [6], залежність між напруженням і деформацією в полімерному бетоні набуде вигляду:

$$\sigma(x, t) = E_1 \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} + \eta \cdot \left(\frac{E_1 + E_2}{E_2} \right) \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x \partial t} - \left(\frac{\eta \cdot \rho}{E_2} \right) \frac{\partial^3 u(x, t)}{\partial t^3}, \quad (1)$$

де $\sigma(x, t)$ – напруження, що виникають в ущільнюваному шарі полімерного бетону; u і x – ейлера і лагранжева координати; E_1 і E_2 – динамічні модулі пружної деформації полімерного бетону; η – коефіцієнт динамічної в'язкості, що враховує внутрішнє тертя в полімерному бетоні. Функціональні вирази для аналітичного визначення значень E_1 , E_2 , η та їх чисельні значення визначені в роботі [6].

Коливання шару полімерного бетону в напрямку координати x за час t матиме вигляд [7, 8]:

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

Підставивши вираз (1) в (2), отримаємо диференціальне рівняння руху ущільнюваного полімерного бетону:

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

Для розв'язання хвильового рівняння коливань (3) скористаємося граничними умовами, що витікають з розрахункової схеми на рис. 1: при $x = 0$:

$$-m \frac{\partial^2 u(0, t)}{\partial t^2} - c_3 u(0, t) + E_1 F \frac{\partial u(0, t)}{\partial x} + \left(\frac{E_1 + E_2}{E_2} \right) \times \times \eta F \frac{\partial^2 u(0, t)}{\partial x \partial t} - \left(\frac{\eta \rho F}{E_2} \right) \frac{\partial^3 u(0, t)}{\partial t^3} = -Q \sin(\omega t), \quad (4)$$

при $x = H$:

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

де m – маса вібраційної плити; c_3 – коефіцієнт жорсткості пружних амортизаторів у вертикальному напрямку в підвісці вібраційної плити; F – площа

опорної поверхні вібраційної плити; Q – амплітуда збуджуючої сили; ω – кутова частота вимушених коливань; H – висота ущільнюваного шару полімерного бетону.

Гранична умова (4) описує взаємодію вібраційної плити з поверхнею ущільнюваного полімерного бетону. Гранична умова (5) свідчить про те, що переміщення ущільнюваного шару полімерного бетону на відстані H від поверхні вібраційної плити дорівнює нулю.

Розв'язання рівняння (3) представимо у вигляді уявної частини комплексного числа [5 – 8]:

$$u(x, t) = u(x) \cdot e^{i\omega t}, \quad (6)$$

де $u(x)$ – комплексна амплітуда коливань, що задовольняє граничним умовам для наведеної розрахункової схеми (рис. 1).

Використовуючи методику, викладену в роботах [5 – 8], знайдемо розв'язок рівняння (3) у комплексному вигляді:

$$u(x, t) = \left[B \cdot e^{-(ik+\alpha)x} + D \cdot e^{(ik+\alpha)x} \right] \cdot e^{i\omega t}, \quad (7)$$

де k – хвильове число; α – коефіцієнт поглинання вібраційного навантаження, який характеризує зменшення амплітуди коливань при віддаленні від джерела збудження; B і D – постійні інтегрування (комплексні амплітуди), що визначаються граничними умовами (4) і (5).

Визначення функціональних значень коефіцієнтів α і k наведено в роботі [7].

Для визначення постійних інтегрування B і D підставимо вираз (7) у граничну умову (5) і, провівши перетворення, знайдемо співвідношення між комплексними амплітудами у вигляді:

$$B = -D \cdot \frac{e^{(ik+\alpha)H}}{e^{-(ik+\alpha)H}}. \quad (8)$$

Підставляючи значення B зі співвідношення (8) у вираз (7), знайдемо розв'язок рівняння (3) у вигляді:

$$u(x, t) = D \left[\frac{-e^{(ik+\alpha)(H-x)} + e^{-(ik+\alpha)(H-x)}}{e^{-(ik+\alpha)H}} \right] e^{i\omega t}. \quad (9)$$

Підставимо вираз (9) в граничну умову (4). На підставі (6) вираз $Q \sin(\omega t)$ в граничній умові (4) може бути представлено у вигляді уявної частини комплексної функції, а саме $Q \sin(\omega t) = Q \cdot e^{i\omega t}$. Після проведених перетворень, отримаємо наступний вираз:

$$D = \frac{Q e^{-(ik+\alpha)H}}{2sh[(ik+\alpha)H] (c_3 + c_n - (m+m_n)\omega^2 + i\omega b_n)}, \quad (10)$$

де c_n – наведений коефіцієнт жорсткості ущільнюваного полімерного бетону; m_n – наведена маса ущільнюваного полімерного бетону; b_n – наведений коефіцієнт дисипативного опору ущільнюваного полімерного бетону.

$$c_n = \frac{F \left[(E_1 \alpha) \operatorname{sh}(2\alpha H) + \left(E_1 k + \eta \omega \alpha \left(\frac{E_1 + E_2}{E_2} \right) \right) \sin(2kH) \right]}{[ch(2\alpha H) - \cos(2kH)]}; \quad (11)$$

$$m_n = \frac{F k \eta \left(\frac{E_1 + E_2}{E_2} \right) \operatorname{sh}(2\alpha H)}{\omega \cdot [ch(2\alpha H) - \cos(2kH)]}; \quad (12)$$

$$b_n = \frac{1}{\omega} \left[\frac{F \left[\left(E_1 k + \eta \omega \alpha \left(\frac{E_1 + E_2}{E_2} \right) \right) \operatorname{sh}(2\alpha H) - \left(E_1 \alpha - \omega \eta k \left(\frac{E_1 + E_2}{E_2} \right) \right) \sin(2kH) \right]}{[ch(2\alpha H) - \cos(2kH)]} - \frac{F \omega^3 \rho}{E_2} \right]. \quad (13)$$

З виразів (11) – (13) витікає, що чисельні значення коефіцієнтів c_n , b_n і m_n залежать від площі опорної поверхні F вібраційної плити; динамічних модулів пружної деформації полімерного бетону E_1 і E_2 ; коефіцієнта динамічної в'язкості η ; кутової частоти вимушених коливань ω ; висоти ущільнюваного шару полімерного бетону H , коефіцієнта поглинання вібраційного навантаження α та хвильового числа k .

Підставивши значення постійної інтегрування D з (10) у вираз (8), визначимо постійну інтегрування B :

$$B = - \frac{Q e^{(ik+\alpha)H}}{2 \operatorname{sh}[(ik+\alpha)H] [c_3 + c_n - (m+m_n)\omega^2 + i\omega b_n]}. \quad (14)$$

Підставляючи знайдені постійні інтегрування (10) і (14) в залежність (7), знайдемо в комплексній формі рішення хвильового рівняння коливань (3), що задовольняє граничним умовам (4) і (5):

$$u(x,t) = \frac{Q \operatorname{sh}[(ik+\alpha)(H-x)] e^{i\omega t}}{\operatorname{sh}[(ik+\alpha)H] [c_3 + c_n - (m+m_n)\omega^2 + i\omega b_n]} \quad (15)$$

і, виділяючи з отриманого виразу уявну частину комплексної функції, отримаємо рішення хвильового рівняння коливань (3), що задовольняє граничним умовам (4) і (5) у вигляді:

$$u(x,t) = \frac{A}{\sqrt{(sh\alpha H \cos kH)^2 + (ch\alpha H \sin kH)^2}} \times \\ \times [sh[\alpha(H-x)] \cos[k(H-x)] \sin(\omega t - \theta) + \\ + ch[\alpha(H-x)] \sin[k(H-x)] \cos(\omega t - \theta)], \quad (16)$$

де A – амплітуда вимушених коливань вібраційної плити та верхнього шару полімерного бетону:

$$A = \frac{Q}{\sqrt{[c_3 + c_n - (m+m_n)\omega^2]^2 + \omega^2 b_n^2}}; \quad (17)$$

$$\theta = \varphi_1 + \varphi_2; \quad (18)$$

$$\varphi_1 = \arctg \left(\frac{\omega \cdot b_n}{c_3 + c_n - (m+m_n)\omega^2} \right); \quad (19)$$

$$\varphi_2 = \arctg(ch(\alpha H) \cdot tg(kH)). \quad (20)$$

Вираз (16) описує закон руху ущільнюваного вібраційною плитою полімерного бетону динамічної системи «вібраційна плита – полімерний бетон» в напрямку координати x залежно від кутової частоти вимушених коливань ω , амплітуди збуджуючої сили Q , товщини шару полімерного бетону H і часу t .

При $x=0$ вираз (16) описує закон руху вібраційної плити поверхневого вібраційного робочого органу:

$$u(0,t) = A \cdot \sin(\omega t - \varphi_1). \quad (21)$$

Облік фізико-механічних характеристик ущільнюваного полімерного бетону дозволяє досить точно визначити закон руху вібраційної плити і підібрати режими вібраційного навантаження, за яких забезпечується найефективніше ущільнення полімерного бетону, а отримані вирази (11)–(13) дозволяють визначити фізико-механічні характеристики полімерного бетону при його модельному поданні.

Питома наведена маса m_{ny} , питомі наведені коефіцієнти опору b_{ny} та жорсткості c_{ny} полімерного бетону при коливаннях вібраційної плити у вертикальному напрямку визначаються шляхом ділення m_{ny} , b_n та c_n на площу F основи формуємого виробу:

$$m_{ny} = m_n / F; \quad b_{ny} = b_n / F; \quad c_{ny} = c_n / F. \quad (22)$$

Теоретичні положення перевірялися на лабораторному вібраційному робочому органі з такими основними параметрами: маса вібраційної плити $m = 75$ кг; амплітуда збуджуючої сили $Q = 4415$ Н; кутова частота вимушених коливань $\omega = 293$ рад/с; жорсткість пружних амортизаторів $c_3 = 470880$ Н/м; амплітуда коливань вібраційної плити в холостому режимі $A_{x,x} = 0,68$ мм. Цим вібраційним робочим органом ущільнювався полімерний бетон у формі розміром в плані $0,2 \times 0,4$ м² такого структурного складу [9]: щебінь гранітний фракції 5-20 (50 % від загального об'єму суміші), пісок річковий з модулем крупності $M_k = 1,8$ (22-27 %); маршаліт фракції 0,05 мм (10-15 %); поліефірна смола Filabond 2000 PA (5 %); затверджувач МЕКР-НА-2 (0,5...1 %).

Висота H ущільнюваного шару дорівнювала 50, 60, 80, 100, 120 та 150 мм.

На рис. 2 і 3 показано зміну питомих наведених коефіцієнтів жорсткості c_{ny} та дисипативного опору b_{ny} полімерного бетону при вертикальних коливаннях вібраційної плити залежно від відносної щільності ε та висоти ущільнюваного шару H .

Аналіз отриманих даних показує, що питомий наведений коефіцієнт жорсткості суттєво залежить від висоти шару, що ущільнюється H та відносної щільності ε полімерного бетону. При цьому питомий наведений коефіцієнт дисипативного опору b_{ny} при поверхневому ущільненні суттєво залежить від відносної щільності ε полімерного бетону та в меншій мірі від висоти ущільнюваного шару H .

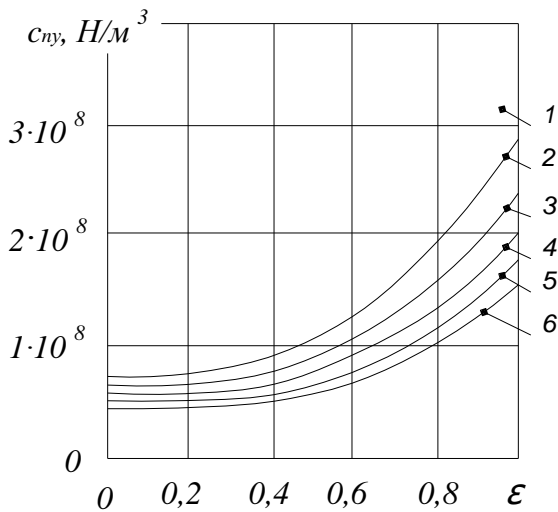


Рисунок 2 – Зміна питомого наведеного коефіцієнта жорсткості c_{ny} полімерного бетону залежно від відносної щільності ε та висоти шару H :
1 – при $H = 50$ мм; 2 – при $H = 60$ мм; 3 – при $H = 80$ мм; 4 – при $H = 100$ мм;
5 – при $H = 120$ мм; 6 – при $H = 150$ мм

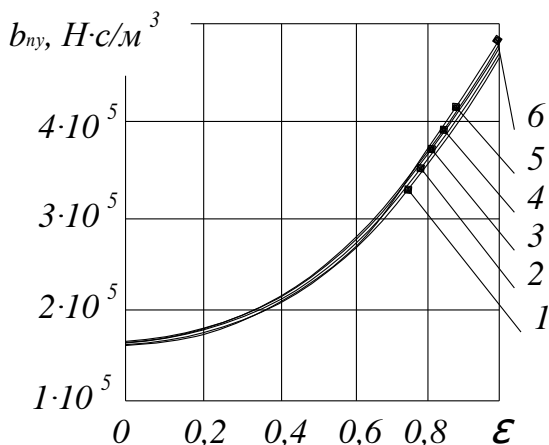


Рисунок 3 – Зміна питомого наведеного коефіцієнту дисипативного опору b_{ny} полімерного бетону залежно від відносної щільності ε та висоти шару H :
1 – при $H = 50$ мм; 2 – при $H = 60$ мм; 3 – при $H = 80$ мм; 4 – при $H = 100$ мм;
5 – при $H = 120$ мм; 6 – при $H = 150$ мм

На рис. 4 показано зміну амплітуди коливань вібраційної плити A залежно від відносної щільності ε та висоти шару H .

Наведені на рис. 4 криві показують, що істотний вплив на амплітуду коливань A вібраційної плити чинять фізико-механічні характеристики полімерного бетону і висота ущільнюваного шару H .

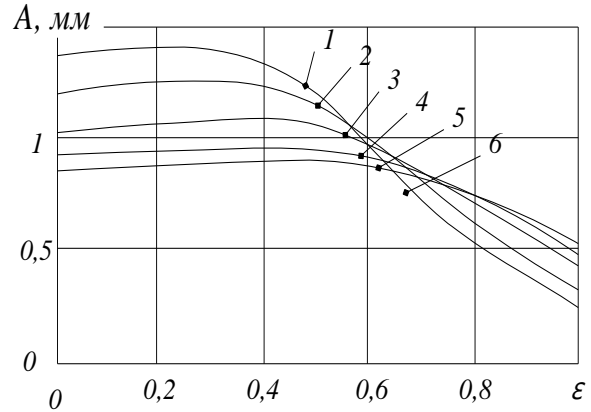


Рисунок 4 – Зміна амплітуди коливань вібраційної плити A залежно від відносної щільності ε та висоти шару H :
1 – при $H = 50$ мм; 2 – при $H = 60$ мм; 3 – при $H = 80$ мм; 4 – при $H = 100$ мм;
5 – при $H = 120$ мм; 6 – при $H = 150$ мм

Так зі збільшенням товщини ущільнюваного шару H від 50 до 150 мм і відносної щільності ε полімерного бетону амплітуда коливань вібраційної плити зменшується.

На початку вібраційного процесу ущільнення при відносній щільності ε від 0 до 0,25 відбувається збільшення амплітуди коливань A вібраційної плити з 1,41 до 1,45 мм при $H = 50$ мм; з 1,22 до 1,26 мм при $H = 60$ мм.

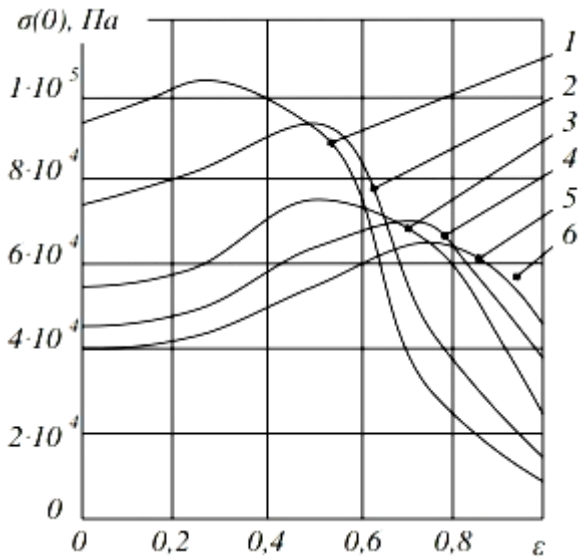
Для шарів висотою $H = 80, 100$ і 120 мм збільшення амплітуди коливань A вібраційної плити відбувається при відносній щільності ε в діапазоні від 0 до 0,5 з 1,02 до 1,06 мм при $H = 80$ мм; з 0,92 до 0,95 мм при $H = 100$ мм та з 0,85 до 0,86 мм при $H = 120$ мм. При висоті шару $H = 150$ мм амплітуда коливань дорівнює 0,78 мм при ε від 0 до 0,5.

При подальшому ущільненні полімерного бетону зазначеного складу та відносній щільності ε від 0,5 до 1 при значеннях висот шарів $H = 50, 60, 80$ і 100 мм відбувається суттєве зменшення амплітуди коливань A вібраційної плити відповідно до 0,25, 0,31, 0,41 і 0,49 мм. Для шарів висотою $H = 120$ і 150 мм амплітуда коливань A вібраційної плити зменшується до 0,53 та 0,55 мм відповідно.

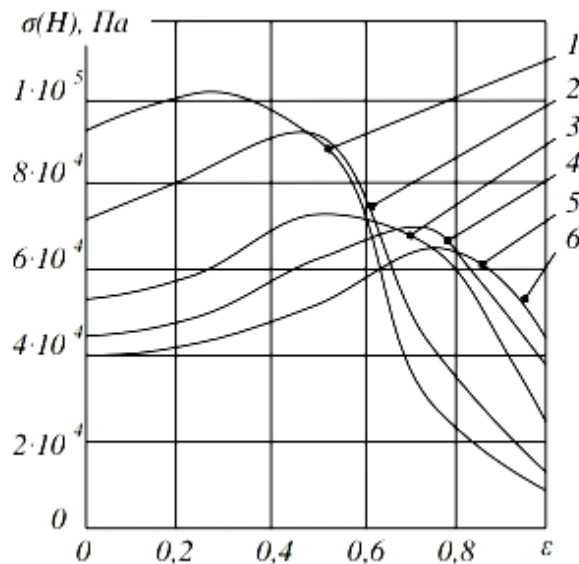
Отже, на самому початку вібраційного процесу ущільнення при відносній щільності ε від 0 до 0,5 вібраційна плита працює у вібраційному режимі. При реалізації цього робочого режиму не відбувається відриву вібраційної плити від поверхні ущільнюваного шару полімерного бетону.

При подальшому збільшенні відносної щільності ε від 0,5 до 1 при висотах шарів від 50 до 100 мм динамічна система переходить в віброударний режим роботи, при якому вібраційна плита відривається від поверхні ущільнюваного шару полімерного бетону і рухається в повітрі до наступного удару.

На рис. 5 показано зміну напружень, які виникають на поверхні а) та в основі б) ущільнюваного шару полімерного бетону.



а)



б)

Рисунок 5 – Зміна напружень на поверхні $\sigma(0)$ а) та в основі $\sigma(H)$ б) ущільнюваного шару полімерного бетону залежно від відносної щільності ε і висоти H шару, що ущільнюється:

- 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; 6 – при $H = 150$ мм

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що зі збільшенням висоти H ущільнюваного шару полімерного бетону величина напружень на його поверхні $\sigma(0)$ та в основі $\sigma(H)$ зменшується (рис. 5 а, б). Причому для обраного вібраційного режиму різниця між напруженнями на поверхні $\sigma(0)$ а) та в основі $\sigma(H)$ шару полімерного бетону не перевищує 0,5-11 % залежно від відносної щільності ε і висоти H шару, що ущільнюється.

На початку вібраційного процесу ущільнення відбувається збільшення величини напружень σ в ущільнюваному шарі. Так для шару висотою $H = 50$ мм збільшення напружень $\sigma(0)$ та $\sigma(H)$ відбувається при відносній щільності $0 \leq \varepsilon \leq 0,25$; для $H = 60$ та 80 мм – при $0 \leq \varepsilon \leq 0,5$; для $H = 100, 120$ і 150 мм збільшення величини напружень відбувається при $0 \leq \varepsilon \leq 0,75$. При подальшому збільшенні відносної щільності ε величина напружень σ зменшується. Це пояснюється тим, що при обраному вібраційному режимі для зазначених висот шарів H і діапазонів відносної щільності ε відбувається спочатку збільшення амплітуди коливань A вібраційної плити (рис. 4). При подальшому збільшенні відносної щільності ε до 1 амплітуда коливань A вібраційної плити зменшується, а відповідно зменшуються і напруження у шарах полімерного бетону.

ВИСНОВКИ. У результаті проведених досліджень динамічної системи «вібраційна плита – полімерний бетон» отримано теоретичні вирази, які дозволяють визначити закономірності зміни напружень, які виникають в ущільнюваному шарі полімерного бетону при його ущільненні вібраційною плитою залежно від його фізико-механічних характеристик, амплітуди і частоти вимушених коливань і висоти шару, що ущільнюється.

Отримані результати покладені в основу проведення подальших теоретичних досліджень, які дозволять визначити характер зміни напружень по висоті ущільнюваного шару полімерного бетону залежно від відносної щільності, а також провести аналіз і синтез отриманого віброударного режиму роботи вібраційної плити.

ЛІТЕРАТУРА

1. Juradin S., Baloevič G., Harapin A. Impact of Vibrations on the Final Characteristics of Normal and Self-compacting Concrete. *Journal of Materials Research*. 2014, Vol. 17(1), pp. 178–185.
2. Sudarshan N. M., Chandrashekar Rao T. Vibration Impact on Fresh Concrete of Conventional and UHPFRC. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, Vol. 12, 8th edn, pp. 1683–1690.
3. Koh H. B., Yeoh D., Shahidan S. Effect of revibration on the compressive strength and surface hardness of concrete. IOP Conf. Series: *Materials Science and Engineering*. 2017, Vol. 271, 012057, pp. 1–6.
4. Gutierrez J., Ruiz E., Trochu F. High-frequency vibrations on the compaction of dry fibrous reinforcements. *Journal of Advanced Composite Materials*. 2013, Vol. 22(1), pp. 13–27.

5 Савелов Д. В. Разработка теории взаимодействия поверхностного вибрационного рабочего органа с полимерным бетоном при его модельном представлении. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. – Кременчук: КрНУ, 2019. – Вип. 6/2019 (119). – С. 126–132. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.6.126-132>.

6. Maslov A., Savelov D., Vakulenko R. Theoretical determination of the law of motion of vibrating plate at surface compaction of polymer concrete. *Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво/ Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*. Випуск 1 (56). 2021. С. 5–11.

7. Маслов А. Г., Савелов Д. В. Теоретическое определение закона движения подвижной рамы виброплощадки с полимерным бетоном при его уплотнении. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 2020. Вип. 4/2020 (123). С. 84–90.

<https://doi.org/10.30929/1995-0519.2020.4.84-90>.

8. Маслов О. Г., Савелов Д. В. Теоретичні дослідження напружено-деформованого стану ущільнюваного середовища динамічної системи «вібромайданчик – полімерний бетон». *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. – Кременчук: КрНУ, 2021. – Вип. 1/2021 (126). – С. 92–97. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2021.1.92-97>.

9. Маслов А. Г., Савелов Д. В. Разработка структурного состава полимерного бетона. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. – Кременчук: КрНУ, 2018. – Вип. 4/2018 (111). – С. 94–99. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2018.4.94-99>.

10. Маслов А. Г., Савелов Д. В. Реологические характеристики полимерного бетона. *Збірник наукових праць за матеріалами VII Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту»* 11-13 листопада 2020 року, м. Кременчук. С. 167-169.

THEORETICAL DEFINITION OF THE LAW OF STRESS CHANGES THAT OCCUR IN POLYMER CONCRETE WHEN IT IS COMPACTED BY A VIBRATING PLATE

O. Maslov, D. Savielov

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University

ORCID: 0000-0002-8860-2035; 0000-0002-5170-9621

Purpose. Based on a thorough analysis of the scientific and technical literature, it is established that for the mass production of quality materials and products from polymer concrete compositions, the most effective will be a vibration method of sealing, 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 of the surface vibrating working body with polymer concrete, the study of the dynamic system "vibration plate - 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 make it possible to reasonably determine the rational parameters of the surface vibrating working body depending on the physical and mechanical properties of the compacted polymer concrete.

Key words: vibration plate, polymer concrete, vibrations, stress, deformation.

REFERENCES

1. Juradin S., Baloeviж G., Harapin A. (2014), Impact of Vibrations on the Final Characteristics of Normal and Self-compacting Concrete. *Journal of Materials Research*. 2014, Vol. 17(1), pp. 178–185.

2. Sudarshan N. M., Chandrashekar Rao T. (2017), Vibration Impact on Fresh Concrete of Conventional and UHPFRC. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, Vol. 12, 8thedn, pp. 1683–1690.

3. Koh H. B., Yeoh D., Shahidan S. (2017), Effect of revibration on the compressive strength and surface hardness of concrete. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017, Vol. 271, 012057, pp. 1–6.

4. Gutierrez J., Ruiz E., Trochu F. (2013), High-frequency vibrations on the compaction of dry fibrous reinforcements. *Journal of Advanced Composite Materials*. 2013, Vol. 22(1), pp. 13–27.

5. Savielov D. V. (2019), Razrabotka teorii vzai-

modejstviya poverhnostnogo vibracijnogo rabocheho organa s polimernym betonom pri ego model'nom predstavlenii [Development of interaction surface selective working body with polymer concrete during its modeling theory]. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. Kremenchug: KRNU, Issue 9/2019 (119).* – pp. 126–132 [in Ukraine] <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.6.126-132>

6. Maslov A., Savelov D., Vakulenko R. (2020), Teoretichne viznachennya zakonu ruhu vibracijnoї pliti pri poverhnevomu ushchil'neni polimernogo betonu [Theoretical determination of the law of motion of vibrating plate at surface compaction of polymer concrete]. *Transactions of National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». Poltava: Issue 1 (56). 2021 – pp. 5-11* [in Ukraine].

7. Maslov A. H., Savelov D. V. (2020), Teoreticheskoe opredelenie zakona dvizheniya podvizhnoj ramy vibroploshchadki s polimernym betonom pri ego uplotnenii [Theoretical definition of the law of motion for mobile frame of a vibrating platform with polymer concrete when compacting it]. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. Kremenchug: KRNU, Issue 4/2020 (123).* – pp. 84–90 [in Ukraine]

<https://doi.org/10.30929/1995-0519.2020.4.84-90>.

8. Maslov A. H., Savelov D. V. (2020), Teoretichni doslidzhennya napruzhenno-deformovanogo stanu ushchil'nyuvanogo seredovishcha dinamichnoї sistemi «vibromajdanchik – polimernij beton» [Theoretical studies of the strain-deformed state of the compacted medium of the dynamic system “vibrating platform-polymer concrete”]. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. Kremenchug: KRNU, Issue 1/2021 (126).* – pp. 92–97 [in Ukraine] <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2021.1.92-97>.

9. Maslov A. H., Savelov D. V. (2018), Razrabotka strukturnogo sostava polimernogo betona [Development of the structural composition of polymer concrete]. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. Kremenchug: KRNU, Issue 4/2018 (111).* – pp. 94–99 [in Ukraine] <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2018.4.94-99>.

10. Maslov A. H., Savelov D. V. (2020), Rheological characteristics of polymer concrete. Collection of Papers for Materials of the VII International Science and Technology Conference "Current trends in the development of machinery and transport" 11-13 November, 2020, Kremenchuk. P. 167–169.

Стаття надійшла 09.08.2021