

**Савєлов Д. В.**

к.т.н., доцент

**Кременчуцький  
національний  
університет імені  
Михайла  
Остроградського****Savielov D.**

Ph.D., Associate Professor

**Kremenchuk Mykhailo  
Ostrohradskyi National  
University****УДК 666.97.035****DOI: 10.37128/2306-8744-2021-4-4****ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМУ  
РОБОТИ ДИНАМІЧНОЇ  
СИСТЕМИ «ВІБРАЦІЙНА ПЛИТА  
- ПОЛІМЕРНИЙ БЕТОН» ПІД ЧАС  
ПОВЕРХНЕВОГО УЩІЛЬНЕННЯ**

Для теоретичного визначення закону руху та режимів роботи вібраційної плити поверхневого вібраційного робочого органу з полімерним бетоном виконано дослідження динамічної системи «вібраційна плита – полімерний бетон». У даній динамічній системі ущільнюваний полімерний бетон зображено у вигляді системи з розподіленими параметрами, яка враховує дію пружних і дисипативних сил опору, що діють з боку полімерного бетону при його деформуванні у формі на жорсткій основі. Відповідно до прийнятої реологічної моделі полімерного бетону для умов одноосного напруженого стану запропонована залежність у приватних похідних між напруженням і деформацією полімерного бетону, характер якої залежить від динамічного модуля пружної деформації, динамічного модуля пружної деформації Максвелла та коефіцієнта динамічної в'язкості.

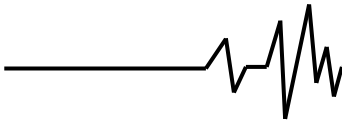
Складено хвильове рівняння коливань, яке описує поширення пружно-в'язких хвиль деформації у полімерному бетоні, що деформується поверхневим вібраційним робочим органом, розв'язання якого дозволило визначити: закономірність поширення пружно-в'язких хвиль деформації у полімерному бетоні, що ущільнюється, а також теоретичні вирази для чисельного визначення наведених коефіцієнтів жорсткості та дисипативного опору полімерного бетону, приєднаної маси; закон руху і амплітуду коливань вібраційної плити, а також закономірності руху поверхневого шару полімерного бетону.

Отримані теоретичні залежності дозволяють обґрунтовано визначити раціональні параметри вібраційного робочого органу та основні режими роботи вібраційної плити залежно від знайдених фізико-механічних характеристик ущільнюваного полімерного бетону. Отримані результати можуть надалі використовуватися у разі проведення теоретичних досліджень щодо аналітичного визначення характеру зміни напружень за висотою ущільнюваного шару полімерного бетону, а також під час аналізу та синтезу отриманого віброударного режиму роботи вібраційної плити.

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

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Під час реалізації технологічного процесу поверхневого ущільнення полімерного бетону вібраційним способом відбувається взаємодія вібраційної плити робочого органу з

полімерним бетоном. Відомо, що фізико-механічні характеристики ущільнюваного полімерного бетону чинять суттєвий вплив на поведінку динамічної системи вібраційного обладнання і вибір його основних робочих



параметрів. Визначення фізико-механічних характеристик ущільнюваного полімерного бетону дозволить аналітично визначити закон руху і амплітуду коливань вібраційної плити, що взаємодіє з полімерним бетоном, і оцінити режими роботи вібраційної плити як у стаціонарних (сталих), так і у перехідних зонах руху. Це, у свою чергу, дозволить правильно підібрати технологічні параметри вібраційної дії, застосування яких забезпечить ефективне ущільнення полімерного бетону.

Наразі під час виробництва напівфабрикатів з полімерного бетону використовується технологія поверхневого вібраційного ущільнення звичайного цементного бетону або залізобетону. Однак копіювання технологічних режимів і операцій без належного обліку специфічних особливостей і властивостей полімерної бетонної суміші не дозволить проявитися у належній мірі позитивним якостям виробів з полімерного бетону [1 – 4].

На сьогоднішній день проведені дослідження процесу вібраційного ущільнення полімерного бетону на вібраційному майданчику з вертикально спрямованими коливаннями [5 – 9]. У роботах [5, 6] складена математична модель динамічної системи вібромайданчика, що взаємодіє з полімерним бетоном, та отримано аналітичні вирази для визначення динамічних модулів пружної деформації і коефіцієнта динамічної в'язкості полімерного бетону [7 – 9], закону руху рухомої рами віброплощини і полімерного бетону залежно від його фізико-механічних характеристик, амплітуди і частоти вимушених коливань та висоти шарів, що ущільнюються.

Усі ці результати отримані для визначення робочих параметрів вібраційних майданчиків і не можуть бути застосовані для поверхневих віброущільнювачів полімерного бетону.

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

де  $\sigma(x, t)$  – напруження, що виникають в ущільнюваному шарі полімерного бетону;  $u$  і  $x$  – ейлерова і лагранжева координати;  $E_1$  і  $E_2$  – динамічні модулі пружної деформації полімерного бетону;  $\eta$  – коефіцієнт динамічної в'язкості, що враховує внутрішнє тертя у полімерному бетоні;  $\omega$  – кутова частота вимушених коливань;  $t$  – поточний час.

Аналітичні вирази та функціональні значення динамічних модулів  $E_1$ ,  $E_2$  та коефіцієнта  $\eta$  визначені у роботах [5, 10].

Тому у роботах [10, 11] обґрунтовано розрахункову схему динамічної системи «вібраційна плита – полімерний бетон». Тут полімерний бетон уявлено як систему з розподіленими параметрами, а його реологічні властивості описано моделлю Зінера, яка поряд із зворотною і незворотною деформацією описує оборотну високоеластичну деформацію, яка найбільш наочно виявляється у середовищі, до складу яких входять полімери [8, 12]. У роботі [11] визначені закономірності зміни напружено-деформований стану полімерного бетону під час його ущільнення вібраційною плитою. Однак, для ефективної роботи поверхневого вібраційного ущільнювача необхідно точно дослідити поведінку зазначеної динамічної системи і визначити можливі режими вібраційного впливу залежно від фізико-механічних характеристик ущільнювального середовища.

Отже, проведення подальших аналітичних досліджень поведінки динамічної системи «вібраційна плита – полімерний бетон», спрямованих на точне визначення режимів роботи вібраційної плити залежно від фізико-механічних характеристик ущільнювального середовища є актуальним завданням.

#### **Формулювання мети досліджень.**

Метою цих досліджень є аналітичне визначення закону руху і режимів роботи вібраційної плити динамічної систем «вібраційна плита – полімерний бетон» при поверхневому ущільненні.

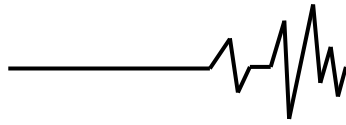
**Викладення основного матеріалу дослідження.** Відповідно до запропонованої розрахункової схеми динамічної системи «вібраційна плита – полімерний бетон» та реологічної моделі полімерного бетону [10, 11], залежність між напруженням і деформацією у полімерному бетоні має вигляд:

Коливання шару полімерного бетону в напрямку координати за час матиме вигляд [11]:

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

де  $\rho$  – щільність полімерного бетону.

У разі підстановки виразу (1) в (2), отримаємо диференціальне рівняння руху ущільнюваного полімерного бетону у вигляді:



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

Для розв'язування хвильового рівняння умовами, які витікають з розрахункової схеми коливаль (3) скористаємося граничними на рис. 1:

у разі, якщо  $x = 0$ :

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

у разі, якщо  $x = H$ :

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

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;  $H$  – 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'язок рівняння (3) шукатимемо у вигляді уявної частини комплексного числа [5, 9]:

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

де  $u(x)$  – комплексна амплітуда коливаль, яка задовольняє граничним умовам щодо розрахункової схеми на рис. 1.

Використовуючи методику, викладену у роботах [5, 6, 10], знайдемо розв'язок рівняння (6) у комплексному вигляді:

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

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

де  $c_n$  і  $b_n$  – відповідно наведені коефіцієнти жорсткості й дисипативного опору ущільнюваного полімерного бетону;  $m_n$  –

де  $B$  і  $D$  – постійні інтегрування (комплексні амплітуди), що визначаються граничними умовами (4) і (5).

Функціональні значення коефіцієнтів  $\alpha$  і  $k$  визначені у роботі [5].

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

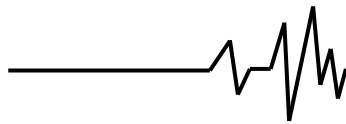
$$B = -D \cdot \frac{e^{(ik+\alpha)H}}{e^{-(ik+\alpha)H}}, \quad (8)$$

та підставляючи значення  $B$  з (8) до виразу (7), отримаємо 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) у граничну умову (4). На підставі (6) вираз  $Q \sin(\omega t)$  у граничній умові (4) можна записати як уявну частину комплексної функції, а саме  $Q \sin(\omega t) = Q \cdot e^{i\omega t}$ . Після проведених перетворень визначимо постійну інтегрування в наступному вигляді:

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



$$b_n = \frac{1}{\omega} \left[ \frac{F \left[ \left( E_1 k + \eta \omega \alpha \left( \frac{E_1 + E_2}{E_2} \right) \right) \text{sh}(2\alpha H) - \left( E_1 \alpha - \omega \eta k \left( \frac{E_1 + E_2}{E_2} \right) \right) \sin(2kH) \right]}{[ch(2\alpha H) - \cos(2kH)]} - \frac{F \omega^3 \rho}{E_2} \right]; \quad (12)$$

$$m_n = \frac{F k \eta \left( \frac{E_1 + E_2}{E_2} \right) \text{sh}(2\alpha H)}{\omega \cdot [ch(2\alpha H) - \cos(2kH)]}; \quad (13)$$

З виразів (11) – (13) витікає, що чисельні значення коефіцієнтів  $c_n$ ,  $b_n$  й  $m_n$  залежать від площі опорної поверхні  $F$  вібраційної плити; динамічних модулів пружної деформації полімерного бетону  $E_1$  і  $E_2$ ;

коефіцієнта динамічної в'язкості  $\eta$ ; кутової частоти вимушених коливань  $\omega$ ; висоти ущільнюваного шару полімерного бетону  $H$ , коефіцієнта поглинання вібраційного навантаження  $\alpha$  й хвильового числа  $k$ .

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

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

Підставляючи знайдені постійні інтегрування (10) і (14) в залежність (7), знайдемо в комплексній формі розв'язок

хвильового рівняння коливань (3), який задовольняє граничним умовам (7) і (8):

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

Помножимо чисельник і знаменник виразу (15) на комплексне число  $(c_3 + c_n - (m + m_n)\omega^2 - i\omega b_n)$ , попередньо виконавши розкладання виразів  $sh[(ik+\alpha)(H-x)]$  у чисельнику і

$sh[(ik+\alpha)H]$  у знаменнику, і, виділяючи з отриманого виразу уявну частину комплексної функції, отримаємо розв'язок хвильового рівняння коливань (3), що задовольняє граничним умовам (4) і (5):

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

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

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

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

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

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

Вираз (16) описує закон руху ущільнюваного вібраційною плитою

полімерного бетону досліджуваної динамічної системи «вібраційна плита-полімерний бетон» у напрямку координати  $x$  залежно від кутової частоти вимушених коливань  $\omega$ , амплітуди збуджуючої сили  $Q$ , висоти шару  $H$  і поточного значення часу  $t$ .

У разі, коли  $x = 0$ , вираз (16) описує закон руху вібраційної плити поверхневого вібраційного робочого органу у вигляді:

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

Облік фізико-механічних характеристик ущільнюваного полімерного бетону дозволяє точно визначити закон руху вібраційної плити та підібрати режими вібраційної дії, під час яких



забезпечується найефективніше ущільнення полімерного бетону.

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 режимі холостого ходу  $A_{x,x} = 0,68$  мм. Цим вібраційним робочим органом ущільнювався полімерний бетон у формі розміром в плані  $0,2 \times 0,4$  м<sup>2</sup> такого структурного складу [13]: 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 становила 50, 60, 80, 100, 120 і 150 мм.

На рис. 1 показано криві зміни амплітуди коливань вібраційної плити  $A$  залежно від відносної щільності  $\varepsilon$  й висоти ущільнюваного шару  $H$ .

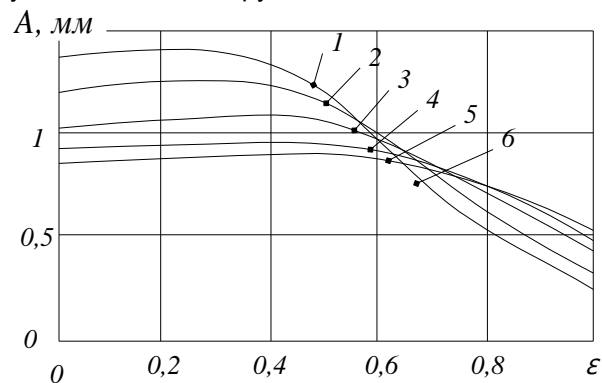


Рис. 1. Зміна амплітуди коливань  $A$  вібраційної плити залежно від відносної щільності  $\varepsilon$  й висоти ущільнюваного шару  $H$ :

- 1 –  $H = 50$  мм; 2 –  $H = 60$  мм; 3 –  
 $H = 80$  мм; 4 –  $H = 100$  мм;  
5 –  $H = 120$  мм; 6 –  $H = 150$  мм

Наведені на рис. 2 криві показують, що суттєвий вплив на амплітуду коливань  $A$  вібраційної плити чинять фізико-механічні характеристики полімерного бетону і висота шару  $H$ , що ущільнюється.

Зі збільшенням товщини шару, що ущільнюється  $H$  від 50 до 150 мм і відносної

щільності  $\varepsilon$  полімерного бетону амплітуда коливань вібраційної плити зменшується.

На самому початку вібраційного процесу ущільнення для відносної щільності  $\varepsilon$  від 0 до 0,25 відбувається збільшення амплітуди коливань  $A$  вібраційної плити з 1,41 до 1,45 мм у разі  $H = 50$  мм; з 1,22 до 1,26 мм у разі  $H = 60$  мм.

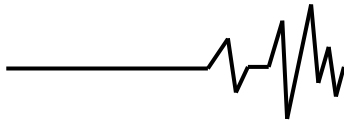
Для шарів висотою  $H = 80, 100$  й  $120$  мм зростання амплітуди коливань  $A$  вібраційної плити відбувається для відносної щільності  $\varepsilon$  у діапазоні від 0 до 0,5 з 1,02 до 1,06 мм у разі  $H = 80$  мм; з 0,92 до 0,95 мм у разі  $H = 100$  мм й з 0,85 до 0,86 мм у разі  $H = 120$  мм. У разі висоти шару  $H = 150$  мм амплітуда коливань складає 0,78 мм в діапазоні  $\varepsilon$  від 0 до 0,5.

Під час подальшого ущільнення полімерного бетону такого складу та відносній щільності  $\varepsilon$  від 0,5 до 1 у разі значення висот шарів  $H = 50, 60, 80$  й  $100$  мм відбувається суттєве зменшення амплітуди коливань  $A$  вібраційної плити відповідно до 0,25, 0,31, 0,41 й 0,49 мм. Для шарів товщиною  $H = 120$  і  $150$  мм амплітуда коливань  $A$  вібраційної плити зменшується до 0,53 і 0,55 мм відповідно.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що на самому початку вібраційного процесу ущільнення при відносній щільності  $\varepsilon$  від 0 до 0,5 вібраційна плита працює у вібраційному режимі. При реалізації цього робочого режиму не відбувається відриву вібраційної плити від поверхні ущільнюється шару полімерного бетону. У цьому випадку рух динамічної системи буде описуватися відомим диференціальним рівнянням.

У разі подальшого збільшення відносної щільності  $\varepsilon$  від 0,5 до 1 при висотах шарів  $H$  від 50 до 100 мм динамічна система переходить в віброударний режим роботи, під час якого вібраційна плита відривається від поверхні ущільнюваного шару полімерного бетону і рухається в повітрі до наступного удару. І в цьому випадку доцільно надалі досліджувати дискретний віброударний режим роботи вібраційної плити, яка взаємодіє з полімерним бетоном, представленим знайденими фізико-механічними характеристиками.

Висновки. У результаті дослідження динамічної системи «вібраційна плита – полімерний бетон», у якій полімерний бетон представлено у вигляді системи з розподіленими параметрами, визначено закон руху й основні режими роботи вібраційної плити залежно від знайдених фізико-механічних характеристик ущільнюваного полімерного



бетону. Отримані результати надалі можуть використовуватися для аналізу і синтезу отриманого віброударного режиму роботи вібраційної плити.

#### Список використаних джерел

1. Juradin S., Baloević 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, 8thedn, 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. 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>
6. Маслов О. Г., Савелов Д. В. Теоретичні дослідження напружено-деформованого стану ущільнюваного середовища динамічної системи «вібромайданчик – полімерний бетон». *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*, 2021. – Вип. 1/2021 (126). – С. 92–97 <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2021.1.92-97>
7. 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.
8. Маслов А. Г., Савелов Д. В. Реологическая модель вибрирующего полимерного бетона. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 2019. Вип. 5/2019 (118). – С. 135 – 141. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.5.135-141>
9. Maslov O., Savielov D., Salenko Y., Javadova M. (2022) Theoretical Study of the Dynamic System «Vibration Platform – Polymer Concrete» Stress–Strain State. In: Onyshchenko

V., Mammadova G., Sivitska S., Gasimov A. (eds) *Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations. ICBI 2020. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 181. Springer, Cham. pp 191-201.

[https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_19)

10. 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>
11. Маслов О. Г., Савелов Д. В. Теоретичне визначення закономірності зміни напружень, які виникають у полімерному бетоні при його ущільненні вібраційною плитою. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. – Кременчук: КрНУ, 2021. – Вип. 4/2021 (129). С. 135-141 <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2021.4.135-141>
12. Бобрышев А. Н., Воронов П. В., Галимов Э. Р., Лакно А. В., Абдуллин И. А. Кинетические модели релаксации напряжений в композитах. *Вестник Технологического университета*. 2014. Вып. 17/2014 (14). С. 431–434.
13. 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>

#### References

1. Juradin S., Baloević 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, 8thedn, 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. Maslov A.H., Savelov D.V.(2020). Teoreticheskoe opredelenie zakona dvizheniya podvizhnoy 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>

6. Maslov A.H., Savelov D.V. (2020). Teoretichni doslidzhennya napruzhenodeformovanogo stanu ushchil'nyuvanogo seredovishcha dinamichnoi 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>

7. Maslov A.H., Savelov D.V. 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.

8. Maslov A.H., Savelov D.V. (2019). Reologicheskaya model' vibriruyushchego polimernogo betona [Rheological model of vibrating polymer concrete]. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, KRNU, Issue 5/2019 (118)*. – pp. 135 – 141 [in Ukraine] <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.5.135-141>

9. Maslov O., Savielov D., Salenko Y., Javadova M. (2022) Theoretical Study of the Dynamic System «Vibration Platform – Polymer Concrete» Stress–Strain State. In: Onyshchenko V., Mammadova G., Sivitska S., Gasimov A. (eds) *Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations. ICBI 2020. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 181. Springer, Cham. pp 191-201. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_19)

10. Savielov D.V. (2019). Razrabotka teorii vzaimodejstviya poverhnochnogo vibracionnogo 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, KRNU, Issue 9/2019 (119)*. – pp. 126–132 [in Ukraine] <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.6.126-132>

11. Maslov A.H., Savelov D.V. (2021). Teoretichne viznachennya zakonmirnosti zmini napruzhen', yaki vinikayut' u polimernomu betoni pri jogo ushchil'neni vibracijnoyu plitoyu

[Theoretical definition of the law of stress changes that occur in polymer concrete when it is compacted by a vibrating plate] *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, KRNU, Issue 4/2021 (129)*. – pp. 135–141 [in Ukraine] <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2021.4.135-141>

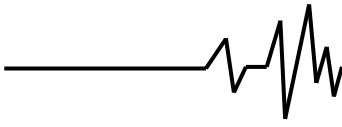
12. Bobryshev A. N., Voronov P. V., Galimov E. R., Lakhno A. V., Abdullin I. A. Kinetic models of stress relaxation in composites. *Bulletin of Technological University*. 2014. Iss. 17/2014 (14). P. 431–434.

13. 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, KRNU, Issue 4/2018 (111)*. – pp. 94–99 [in Ukraine] <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2018.4.94-99>

#### ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ВИБРАЦИОННАЯ ПЛИТА – ПОЛИМЕРНЫЙ БЕТОН» ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ УПЛОТНЕНИИ

Для теоретического определения закона движения и режимов работы вибрационной плиты поверхностного вибрационного рабочего органа с полимерным бетоном выполнено исследование динамической системы «вибрационная плита – полимерный бетон». В данной динамической системе уплотняемый полимерный бетон представлен в виде системы с распределенными параметрами, которая учитывает действие упругих и диссипативных сил сопротивления, действующих со стороны полимерного бетона при его деформировании в форме на жестком основании. Согласно принятой реологической модели полимерного бетона для условий одноосного напряженного состояния предложена зависимость в частных производных между напряжением и деформацией полимерного бетона, характер которой зависит от динамического модуля упругой деформации, динамического модуля упругой деформации Максвелла и коэффициента динамической вязкости.

Составлено волновое уравнение колебаний, которое описывает распространение упруго-вязких волн деформации в полимерном бетоне, который деформируется поверхностным вибрационным рабочим органом, решения которого позволило определить: закономерность распространения упруго-вязких волн деформации в уплотняемом



полимерном бетоне, а также теоретические выражения для численного определения приведенных коэффициентов жесткости и диссипативного сопротивления полимерного бетона, присоединенной массы; закон движения и амплитуду колебаний вибрационной плиты, а также закономерности движения поверхностного слоя полимерного бетона.

Полученные теоретические зависимости позволяют обоснованно определить рациональные параметры вибрационного рабочего органа и основные режимы работы вибрационной плиты в зависимости от найденных физико-механических характеристик уплотняемого вибрацией полимерного бетона. Полученные результаты могут в дальнейшем использоваться для проведения теоретических исследований по аналитическому определению характера изменения напряжений по высоте уплотняемого слоя полимерного бетона, а также при анализе и синтезе полученного виброударного режима работы вибрационной плиты.

**Ключевые слова:** вибрационная плита, полимерный бетон, колебания, деформация.

#### INVESTIGATION OF THE OPERATING MODE OF THE DYNAMIC SYSTEM "VIBRATION PLATE - POLYMER CONCRETE" WITH SURFACE COMPACTION

For the theoretical definition of the law of motion and operating modes of the vibration plate of the surface vibration working body with polymer concrete, a study of the dynamic system "vibration plate - polymer concrete" was carried out. 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 on the part of polymer concrete when it is deformed into a form on a rigid foundation. According to the accepted rheological model of polymer concrete for conditions of uniaxial stress state, a partial derivative relationship is proposed between the stress and deformation of polymer concrete, the nature of which depends on the dynamic modulus of elastic deformation, the dynamic modulus of elastic deformation of Maxwell and the coefficient of dynamic viscosity.

A wave equation of vibrations has been compiled, which describes the propagation of elastic-viscous deformation waves in polymer concrete, which is deformed by a surface vibrating working body, the solutions of which made it possible to determine: the regularity of propagation of elastic-viscous deformation waves in compacted polymer concrete, as well as theoretical expressions for the numerical determination of the reduced coefficients stiffness and dissipative resistance of polymer concrete, added mass; the law of motion and the amplitude of vibrations of the vibrating plate, as well as the laws of motion of the surface layer of polymer concrete.

The obtained theoretical dependences make it possible to reasonably determine the rational parameters of the vibrating working body and the main operating modes of the vibrating plate, depending on the found physical and mechanical characteristics of the polymer concrete compacted by vibration. The results obtained can be further used to carry out theoretical studies on the analytical determination of the nature of the change in stresses along the height of the compacted layer of polymer concrete, as well as in the analysis and synthesis of the obtained vibro-shock mode of operation of the vibrating plate.

**Key words:** vibrating plate, polymer concrete, vibrations, deformation.

#### Відомості про автора

**Савєлов Дмитро Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського (вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, Україна, 39600, e-mail: [dvsavelov@gmail.com](mailto:dvsavelov@gmail.com) )

**Савєлов Дмитрій Владимирович** - кандидат технічних наук, доцент кафедри машиностроєння Кременчугського національного університету імені Михайла Остроградського (ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, Украина, 39600, e-mail: [dvsavelov@gmail.com](mailto:dvsavelov@gmail.com))

**Savielov Dmitry** – Associate Professor of the Department "Mechanical engineering» of Kremenchuk Mykhailo Ostohradskyyi National University (39600, 20, Pershotravneva Street, Kremenchuk, [dvsavelov@gmail.com](mailto:dvsavelov@gmail.com) )