

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧОГО РЕЖИМУ БЕТНОЗМІШУВАЧА БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ**Ю. С. Саленко, Р. А. Вакуленко, О. Ю. Шевчук, О. В. Лисенко**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: kmt0.43@gmail.com**В. Л. Дятловська**Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ
вул. Перемоги, 17/6, м. Кременчук, 39605, Україна. E-mail: viktoriya.dyat108@gmail.com

Запропонована асфальтозмішувальна установка безперервної дії містить агрегат живлення з дозувальним пристроєм, елеватор для подачі матеріалу до сушильно-змішувального агрегату, у якому мінеральна суміш нагрівається і відбувається випаровування. Нагріта до робочої температури мінеральна суміш перемішується з бітумом до змішувального відділення сушильно-змішувального агрегату і в такому стані подається на вібрлоток. Ця суміш має безліч дефектних агрегатів, що складаються з дрібних і великих частинок що злиплися між собою, покритих бітумною плівкою тільки по поверхні агрегатів і складаються з крапельок бітуму, які покриті оболонками, що утворені мінеральними частинками. У вібрлотку ця суміш піддається вібраційному впливу, під час якого відбувається руйнування дефектних агрегатів за рахунок руйнування сил поверхневого натягу зв'язуючого. Суміш стає дуже рухомою, ущільнюється, а на виході з вібрлотка розпушується кромкою вібрлотка до зручнокладального стану, виключаючи наявність дефектних агрегатів. Наведено розрахункову схему вібрлотка, обладнаного низькочастотним і високочастотним віброзбуджувачем коливань, які створюють змінний амплітудно-частотний вібраційний вплив, що сприяє ефективній обробці асфальтобетонної суміші і водночас забезпечується підвищена якість асфальтобетону.

Ключові слова: асфальтозмішувальна установка, обробка, вібрлоток, вібраційна дія.**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО РЕЖИМА БЕТНОСМЕСИТЕЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ****Ю. С. Саленко, Р. А. Вакуленко, А. Ю. Шевчук, А. В. Лысенко**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: kmt0.43@gmail.com**В. Л. Дятловская**Кременчугский летный колледж Харьковского национального университета внутренних дел
ул. Победы, 17/6, г. Кременчуг, 39605, Украина. E-mail: viktoriya.dyat108@gmail.com

Предлагается асфальтосмесительная установка непрерывного действия включает агрегат питания с дозирующим устройством, элеватор для подачи материала в сушильно-смесительный агрегат, в котором минеральная смесь нагревается и происходит выпаривание. Нагретая до рабочей температуры минеральная смесь перемешивается с битумом в смесительном отделении сушильно-смесительного агрегата и в таком состоянии подается на вибрлоток. Эта смесь имеет множество дефектных агрегатов, состоящих из слипшихся между собой мельчайших и крупных частиц, покрытых битумной пленкой только по поверхности агрегатов и состоящих из капелек битума и покрывающих оболочек, образованных минеральными частицами. В вибрлотке эта смесь подвергается вибрационному воздействию, при котором происходит разрушение дефектных агрегатов за счет разрушения сил поверхностного натяжения связующего. Смесь становится очень подвижной, уплотняется, а на выходе из вибрлотка разрыхляется кромкой вибрлотка до удобоукладываемого состояния, исключая наличие дефектных агрегатов. Приведена расчетная схема вибрлотка, оборудованного низкочастотным и высокочастотным вибровозбудителем колебаний, которые создают переменное амплитудно-частотное вибрационное воздействие, способствующее эффективной обработке асфальтобетонной смеси, что обеспечивает повышенное качество асфальтобетона.

Ключевые слова: асфальтосмесительная установка, обработка, вибрлоток, вибрационное воздействие.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Заключною стадією приготування асфальтобетонних сумішей є перемішування мінеральних матеріалів з бітумом. Бітум, який потрапляє на мінеральний матеріал, поглинає дрібні частинки, водночас утворюється асфальтова в'язуча речовина, у якій окремі частинки й агрегати частинок повністю покриті бітумом. Потім асфальтове в'язуче обволакує більші частинки. Зерна щебеню мають шорстку поверхню, покрити пілуватими частинками, що уповільнюють процес змочування та обволакування зерен бітумом і перешкоджають проникненню бітуму в усі раковини та тріщини мінеральних частинок. У асфальтобетонної суміші, яка виготовляється, є два типи агрегатів [1, 2, 3, 4]: 1) утворених із дрібних і великих части-

нок що злиплися між собою, покритих бітумною плівкою тільки по поверхні агрегатів; 2) складаються з крапельок бітуму та покриваючих оболонок, утворених мінеральними частинками. Оскільки всередині перших агрегатів частинки не пов'язані бітумом, то сили зчеплення між ними малі, а це призводить до зменшення міцності та довговічності асфальтобетонного покриття. Другий тип агрегатів не тільки зменшує міцність асфальтобетону, а й збільшує витрати бітуму. Для формування асфальтобетонного покриття із суміші, що містить такі агрегати, потрібні інтенсивні ущільнювальні навантаження.

Одним із способів зменшення кількості та розмірів агрегатів, які утворюються, є тривале перемішування суміші в лопатевих змішувачах, що зменшує

продуктивність і не завжди передбачає покращення якості суміші, яка виготовляється, іншим – це застосування вібраційного впливу, що прикладається до асфальтобетонної суміші під час виходу із змішувального агрегата [5, 6]. Отримання якісної асфальтобетонної суміші зі спрощеною технологією приготування, з меншими енергетичними затратами і більшою продуктивністю є актуальним завданням.

Мета роботи – створення теоретичних основ для розробки та проектування вібраційного обладнання для обробки асфальтобетонних сумішей.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.
Технологія приготування асфальтобетонних сумішей з використанням вібраційного впливу, що прикладається до суміші після перемішування, містить

просушування та нагрівання мінеральних матеріалів, їх сортування, нагрівання бітуму, дозування мінеральних матеріалів і бітуму, їх перемішування, вивантаження асфальтобетонної суміші до приймального бункера та її вібраційну обробку в транспортувальному вібрлотку, видачу готової суміші до транспортних засобів або до накопичувального бункера.

Застосування вібраційної обробки дозволяє отримати якісну асфальтобетонну суміш зі спрощеною технологією приготування (рис. 1), що містить дозування сирих мінеральних матеріалів і порошку, їх просушування і нагрівання, перемішування мінеральних матеріалів з бітумом у змішувальному відділенні сушильного барабана, вібраційну обробку в транспортувальному вібрлотку та видачу готової суміші до накопичувального бункера.

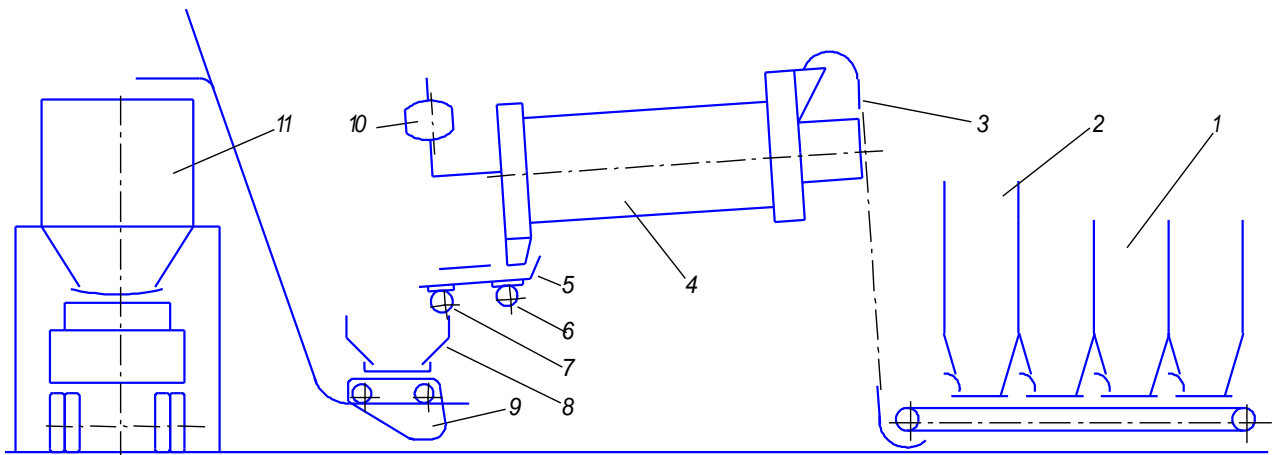


Рисунок 1 – Схема асфальтозмішувальної установки безперервної дії:

- 1 – агрегат живлення; 2 – бункер мінерального порошку; 3 – елеватор; 4 – сушильний агрегат із змішувачем вільного перемішування; 5 – вібраційний лоток; 6, 7 – збудники коливальних рухів, низькочастотний та високочастотний; 8 – приймальний бункер; 9 – скіповий підйомник; 10 – пристрій для дозування бітуму; 11 – накопичувальний бункер

Механізм вібраційної обробки асфальтобетонних сумішей полягає в наступному. Під впливом низькочастотного (кутова частота 135 – 195 рад/с, амплітуда 0,8 – 2 мм) і високочастотного (кутова частота 270 – 390 рад/с, амплітуда 0,5 – 1 мм) джерел вібрації вібрлоток набуває складних просторових коливань [5, 7]. Водночас асфальтобетонна суміш переміщується по вібрлотку і піддається протягом 7 – 20 с змінному амплітудно-частотному вібраційному впливу: кожна точка днища по довжині вібрлотка має свій закон руху – у торця вібрлотка переважає складова низькочастотних, а на його кінці – високочастотних коливань.

Завдяки змінному амплітудно-частотному вібраційному впливу асфальтобетонна суміш спочатку інтенсивно перемішується і потім ущільнюється, водночас руйнуються агрегати мінеральних частинок що злиплися, і оболонки навколо крапельок бітуму, бітум перерозподіляється і рівномірно обволікає кожен частинку, з тріщин і раковин великих мінеральних частинок видаляється повітря і вони заповнюються асфальтовим в'язучим, зменшується товщина бітумних плівок, середовище стає одноріднішим, збільшується зчеплення в'язучого з мінера-

льним матеріалом [8, 9]. Цей процес має незворотний характер. Наприкінці обробки ущільнений шар асфальтобетонної суміші розпушується до зручнорозкладального стану кромкою вібрлотка, який здійснює високочастотні коливання з великою амплітудою. Асфальтобетон на вібрлотку асфальтобетонній суміші щільніший, міцність його на 40 – 60 % вища, ніж асфальтобетону, який не вібрується. Однакових міцних показників з не віброваним, вібрований асфальтобетон досягає із удвічі меншими ущільнювальними навантаженнями.

На ефективність перемішування й обробки асфальтобетонних сумішей і характер руху вібраційного лотка впливає його маса і жорсткість пружних амортизаторів, частота й амплітуда збуджувальних сил низькочастотного і високочастотного збудників коливань і координати їх застосування, фізико-механічні характеристики суміші та товщина оброблюваного шару, кут нахилу вібрлотка та тривалість вібраційної обробки.

Для визначення характеру руху вібрлотка і напруж, що виникають в оброблюваному шарі суміші, розглянемо розрахункову схему вібраційного пристрою (рис. 2). Під час обробки асфальтобетонна

суміш, що являє собою пружньо-в'язкопластичне середовище, ущільнюється від початкового ρ_o до кінцевого ρ_k значень щільності (експериментальні дослідження показують, що щільності ρ_k суміш досягає вже в центрі вібрлотка) і суцільним потоком у режимі без підкидання рухається до розвантажувальної кромки. Під час виходу з лотка суміш розпушується і в зручнооброблюваному вигляді подається до приймального бункера [10, 11].

Диференціальне рівняння руху середовища, що обробляється, в напрямку координати за час має вигляд [3]:

$$E_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + \eta_1 \frac{\partial^3 u_1}{\partial x^2 \partial t} + f_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} - \rho_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

де E_1, η_1, f_1 – середні значення динамічного модуля пружної деформації, динамічної в'язкості та коефіцієнта опору асфальтобетонної суміші; ρ_1 – щільність суміші, еквівалентна значенням $E_1, \eta_1, f_1; u_1$ і x – ейлерова і лагранжева координати,

$$u_1 = u + \varphi l_3, \quad (2)$$

де u – зміщення суміші по центру тяжіння вібраційного лотка; φ – кутовий зсув вібрлотка, l_3 – відстань від центра ваги вібрлотка до рівнодійної сили опору асфальтобетонної суміші.

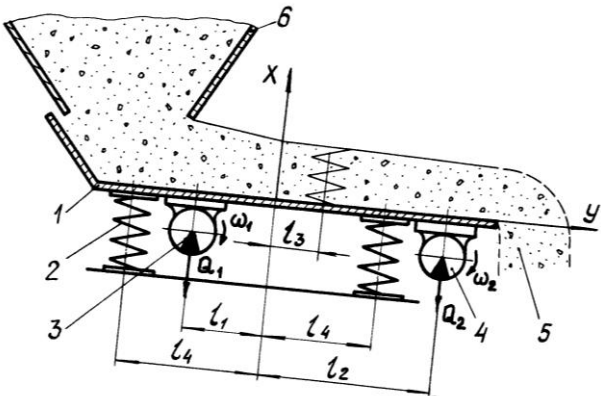


Рисунок 2 – Розрахункова схема вібраційного пристрою для обробки асфальтобетонних сумішей:

- 1 – вібраційний лоток; 2 – пружні опори;
- 3 – збудник коливань низькочастотний; 4 – збудник коливань високочастотний; 5 – асфальтобетонна суміш; 6 – розвантажувальна коробка

Хвильове рівняння коливань (1) розв'язуватимемо за таких граничних умов:

$$\begin{aligned} & -m_1 \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial t^2} - c_3 u(0,t) + E_1 F \left[\frac{\partial u(0,t)}{\partial x} + l_3 \frac{\partial \varphi(0,t)}{\partial x} \right] + \\ & + \eta_1 F \left[\frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial x \partial t} + l_3 \frac{\partial^2 \varphi(0,t)}{\partial x \partial t} \right] + f_1 F [u(0,t) + l_3 \varphi(0,t)] = \\ & = - \sum_{j=1}^2 Q_j \sin \omega_j t; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & -I \frac{\partial^2 \varphi(0,t)}{\partial t^2} - c^3 l_4^2 \varphi(0,t) + E_1 F l_3^2 \frac{\partial \varphi(0,t)}{\partial x} + \\ & + \eta_1 F l_3^2 \frac{\partial^2 \varphi(0,t)}{\partial x \partial t} + f_1 F l_3^2 \varphi(0,t) = \\ & = - \sum_{j=1}^2 Q_j (-1)^j l_j \sin \omega_j t, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} E_1 \left\{ \left[\frac{\partial u(H,t)}{\partial x} + l_3 \frac{\partial \varphi(H,t)}{\partial x} \right] + \eta_1 \left[\frac{\partial^2 u(H,t)}{\partial x \partial t} + \right. \right. \\ \left. \left. + l_3 \frac{\partial^2 \varphi(H,t)}{\partial x \partial t} \right] + f_1 [u(H,t) + l_3 \varphi(H,t)] \right\} F = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

де m_1, J – маса та момент інерції вібраційного лотка; c_3 і l_4 – жорсткість пружних амортизаторів та їх координата центра тяжіння вібрлотка; F – площа дна вібрлотка; H – товщина оброблюваного шару; Q_1 і Q_2 – амплітуди збуджувальних сил низько- і високо- частотного збудника коливань; l_1 і l_2 – координати прикладання збуджувальних сил відносно центра тяжіння вібрлотка; ω_1 и ω_2 – кутові частоти обертання.

Функцію $u_1(x,t)$ подамо у вигляді уявної частини комплексних функцій:

$$\begin{aligned} u_1(x,t) = u(x,t) + l_3 \varphi(x,t) = \\ \sum_{j=1}^2 u_j(x) e^{i\omega_j t} + l_3 \sum_{j=1}^2 \varphi_j(x) e^{i\omega_j t}, \end{aligned} \quad (6)$$

і підставляючи її в рівняння (1), отримаємо:

$$\sum_{j=1}^2 [(E_1 + i\eta_1 \omega_j) \frac{\partial^2 u_j(x)}{\partial x^2} + f_1 \frac{\partial u_j(x)}{\partial x} + \rho_1 \omega_j^2 u_j(x)] = 0; \quad (7)$$

$$+ \rho_1 \omega_j^2 u_j(x) = 0;$$

$$\sum_{j=1}^2 [(E_1 + i\eta_1 \omega_j) \frac{\partial^2 \varphi_j(x)}{\partial x^2} + f_1 \frac{\partial \varphi_j(x)}{\partial x} + \rho_1 \omega_j^2 \varphi_j(x)] = 0; \quad (8)$$

$$+ \rho_1 \omega_j^2 \varphi_j(x) = 0;$$

Розв'язуючи рівняння (7) і (8), знайдемо функції, які з урахуванням виразу (6), матимуть такий вигляд:

$$u(x,t) = \sum_{j=1}^2 e^{-\delta_j x} [(D_{1j} \sin k_{1j} x + D_{2j} \cos k_{1j} x)] e^{i\omega_j(t + \vartheta_{1j} x)} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \varphi(x,t) = \sum_{j=1}^2 e^{-\delta_j x} [(B_{1j} \sin k_{1j} x + B_{2j} \cos k_{1j} x)] e^{i\omega_j(t + \vartheta_{1j} x)} \end{aligned} \quad (10)$$

де $D_{1j}, D_{2j}, B_{1j}, B_{2j}$ – комплексні амплітуди, що визначаються граничними умовами (3–5);

$\delta_{1j}, k_{1j}, \mathcal{G}_{1j}$ – значення фізико-механічних показників оброблюваного (ущільнювального) середовища за середніх значень елементів E_1, η_1, f_1 ;

$$E_1 = E_0 \left(1 + \frac{\mu}{z+1} \right); f_1 = f_0 \left(1 + \frac{\Omega}{\xi+1} \right); \eta_1 = a_1 \rho_1 H;$$

де ρ_1 – еквівалентна значенням E_1, η_1, f_1 щільність асфальтобетонної суміші:

$$\rho_1 = \rho_0 + (\rho_k - \rho_0) \left(\frac{E_1 - E_0}{\mu E_0} \right)^{\frac{1}{z}}; k_1 = \omega_j / \sqrt{\frac{E_1}{\rho_1}};$$

$$\delta_{1j} = \frac{f_1 E_1}{2(E_1^2 + \eta_1^2 \omega_j^2)} + \alpha_{1j}; \mathcal{G}_{1j} = \frac{f_1 \eta_1}{2(E_1^2 + \eta_1^2 \omega_j^2)};$$

$$\alpha_{1j} = \sqrt{-z_{1j}} + \sqrt{z_{2j}};$$

$$z_{1j} = \frac{\rho_1 \omega_j^2 E_1}{2(E_1^2 + \eta_1^2 \omega_j^2)} - \frac{f_1^2 (E_1^2 - \eta_1^2 \omega_j^2)}{8(E_1^2 + \eta_1^2 \omega_j^2)^2};$$

$$z_{2j} = \frac{\rho_1^2 \omega_j^4}{E_1^2 + \eta_1^2 \omega_j^2} - \frac{f_1^4}{16(E_1^2 + \eta_1^2 \omega_j^2)^2} -$$

$$- \frac{\rho_1 \omega_j^2 E_1 f_1^2}{8(E_1^2 + \eta_1^2 \omega_j^2)^2}.$$

Підставляючи вирази (9) і (10) в граничну умову (5), визначимо

$$u(x, t) = \sum_{j=1}^2 D_{2j} e^{-\delta_{1j} x} \left\{ [A_{1j} \sin[k_{1j}(H-x) - \lambda_{1j}] + iA_{2j} \sin[k_{1j}(H-x) - \lambda_{2j}]] / [A_{1j} \sin(k_{1j}H - \lambda_{1j}) + iA_{2j} \sin(k_{1j}H - \lambda_{2j})] \right\} e^{i\omega_j(t + \mathcal{G}_{1j}x)}; \quad (11)$$

$$\varphi(x, t) = \sum_{j=1}^2 B_{2j} e^{-\delta_{1j} x} \left\{ [A_{1j} \sin[k_{1j}(H-x) - \lambda_{1j}] + iA_{2j} \sin[k_{1j}(H-x) - \lambda_{2j}]] / [A_{1j} \sin(k_{1j}H - \lambda_{1j}) + iA_{2j} \sin(k_{1j}H - \lambda_{2j})] \right\} e^{i\omega_j(t + \mathcal{G}_{1j}x)}, \quad (12)$$

де

$$A_{1j} = F \left[(k_{1j} E_1)^2 + (\delta_{1j} E_1 + \mathcal{G}_{1j} \eta_1 \omega_j^2 - f_1)^2 \right]^{0,5}; \quad (13)$$

$$A_{2j} = \omega_j F \left[(\mathcal{G}_{1j} E_1 - \eta_1 \delta_{1j})^2 + (\eta_1 k_{1j})^2 \right]^{0,5}; \quad (14)$$

$$\lambda_{1j} = \arctg \frac{E_1 k_{1j}}{\delta_{1j} E_1 + \sigma_{1j} \eta_1 \omega_j^2 - f_1}; \quad (15)$$

$$\lambda_{2j} = \arctg \frac{\eta_1 k_{1j}}{\eta_1 \delta_{1j} - \mathcal{G}_{1j} E_1}; \quad (16)$$

$$B_{2j} = \theta_j (-1)^j \frac{l_j}{l_3} [A_{1j} \sin(k_{1j}H - \lambda_{1j}) + iA_{2j} \sin(k_{1j}H - \lambda_{2j})] / (M_{2j} + iN_{2j}); \quad (17)$$

$$D_{2j} = Q_j \{ [A_{1j} \sin(k_{1j}H - \lambda_{1j}) + iA_{2j} \sin(k_{1j}H - \lambda_{2j})] / (M_{2j} + iN_{2j}) \} \times \{ Q_j - Q_j (-1)^j [(l_j/l_3) / (M_{1j} + iN_{1j})] \} \times [(A_{1j} - A_{2j}) \sin k_{1j}H + i2A_{1j}A_{2j} \sin k_{1j}H \cos(\lambda_{1j} - \lambda_{2j})], \quad (18)$$

де

$$M_{1j} = A_{1j}(c_4 - m_2 \omega_j^2) \sin(k_{1j}H - \lambda_{1j}) + (A_{1j} - A_{2j}) \sin k_{1j}H; \quad (19)$$

$$N_{1j} = A_{2j}(c_4 - m_2 \omega_j^2) \sin(k_{1j}H - \lambda_{2j}) + 2A_{1j}A_{2j} \sin k_{1j}H \cos(\lambda_{1j} - \lambda_{2j}); \quad (20)$$

$$M_{2j} = A_{1j}(c_3 - m_1 \omega_j^2) \sin(k_{1j}H - \lambda_{1j}) + (A_{1j} - A_{2j}) \sin k_{1j}H; \quad (21)$$

$$N_{2j} = A_{2j}(c_3 - m_1 \omega_j^2) \sin(k_{1j}H - \lambda_{2j}) + 2A_{1j}A_{2j} \sin k_{1j}H \cos(\lambda_{1j} - \lambda_{2j}); \quad (22)$$

$$c_4 = c_3 l_4^2 / l_3^2; \quad m_2 = I / l_3^2. \quad (23)$$

Помноживши чисельники та знаменники виразів (17) і (18) на комплексні числа, сполучені зі знаменниками, потім підставимо ці вирази в залежності (11), (12) і, виділяючи з отриманого виразу уявну частину, визначимо розв'язання рівняння (1), яке задовольняє граничним умовам (3) і (4):

$$u(x, t) = \sum_{j=1}^2 C_j e^{-\delta_{1j} x} \{ A_{1j} \sin[k_{1j}(H-x) - \lambda_{1j}] \times \sin[\omega_j(t + \mathcal{G}_{1j}x) - \psi_{1j}] + A_{2j} \sin[k_{1j}(H-x) - \lambda_{2j}] \times \cos[\omega_j(t + \mathcal{G}_{1j}x) - \psi_{1j}] \}; \quad (24)$$

$$\varphi(x, t) = \sum_{j=1}^2 B_j e^{-\delta_{1j} x} \{ A_{1j} \sin[k_{1j}(H-x) - \lambda_{1j}] \times \sin[\omega_j(t + \mathcal{G}_{1j}x) - \beta_{1j}] + A_{2j} \sin[k_{1j}(H-x) - \lambda_{2j}] \times \cos[\omega_j(t + \mathcal{G}_{1j}x) - \beta_{1j}] \}; \quad (25)$$

$$C_j = \sqrt{D_j^2 + R_j^2 - 2D_j R_j \cos(\beta_{2j} - \psi_{2j})}, \quad (26)$$

$$D_j = \frac{Q_j}{\sqrt{M_{2j}^2 + N_{2j}^2}}; B_j = \frac{Q_j(-1)^j}{\sqrt{M_{1j}^2 + N_{1j}^2}} \cdot \frac{l_j}{l_3^2} \quad (27)$$

$$R_j = Q(-1)^j (l_j/l_3) \sin k_{1j} H \left\{ [(A_{1j}^2 - A_{2j}^2)^2 + 4A_{2j}^2 A_{2j}^2 \cos^2(\lambda_{1j} - \lambda_{2j})] / [(M_{1j}^2 + N_{1j}^2) \times (M_{2j}^2 + N_{2j}^2)] \right\}^{0,5}; \quad (28)$$

$$\beta_{1j} = \arctg \frac{N_{1j}}{M_{1j}}; \beta_{2j} = \arctg \frac{N_{2j}}{M_{2j}}; \quad (29)$$

$$\psi_{1j} = \arctg \{ [D_j \sin \beta_{2j} - R_j \sin(\beta_{1j} + \beta_{2j} - \psi_{2j})] / [D_j \cos \beta_{2j} - R_j \cos(\beta_{1j} + \beta_{2j} - \psi_{2j})] \}; \quad (30)$$

$$\psi_{2j} = \arctg \frac{2A_{1j}A_{2j} \cos(\lambda_{1j} - \lambda_{2j})}{A_{1j}^2 - A_{2j}^2}, \quad (31)$$

Використовуючи вирази (24) і (25), визначимо в першому наближенні переміщення ущільнювального середовища залежно від координат x, y і часу t

$$u_y(x, t) = u(x, t) + y\varphi(x, t). \quad (32)$$

При $x = 0$ рівняння (32) описує рух основи оброблюваного шару асфальтобетонної суміші та днища вібротокта:

$$u_y(0, t) = \sum_{j=1}^2 A_{3j} [C_j \sin(\omega_j t - \psi_{1j} + \psi_{3j}) + yB_j \sin(\omega_j t - \beta_{1j} + \psi_{3j})], \quad (33)$$

де

$$A_{3j} = [A_{1j}^2 \sin^2(k_{1j}H - \lambda_{1j}) + A_{2j}^2 \sin^2(k_{1j}H - \lambda_{2j})]; \quad (34)$$

$$\psi_{3j} = \arctg \frac{A_{2j} \sin(k_{1j}H - \lambda_{2j})}{A_{1j} \sin(k_{1j}H - \lambda_{1j})}. \quad (35)$$

Отриманий вираз (33) можна подати у вигляді:

$$u_y(0, t) = \sum_{j=1}^2 A_j(y) \sin(\omega_j t - \psi_j), \quad (36)$$

де

$$A_j(y) = A_{3j} \sqrt{C_j^2 + y^2 B_j^2 + 2C_j B_j y \cos(\psi_{1j} - \beta_{1j})}; \quad (37)$$

$$\psi_j = \psi_{3j} + \arctg \frac{C_j \sin \psi_{1j} + yB_j \sin \beta_{1j}}{C_j \cos \psi_{1j} + yB_j \cos \beta_{1j}}. \quad (38)$$

Для уточнення переміщення ущільнювального середовища за координатою x умовно розіб'ємо шар асфальтобетону за координатою y на ряд елементарних обсягів, в основі яких діють збуджувальні сили (36), а диференціальне рівняння руху має вигляд:

$$E \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^3 v}{\partial x \partial t} + f \frac{\partial v}{\partial x} - \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0, \quad (39)$$

де v – переміщення ущільнювального середовища в напрямку координати x в кожному елементарному обсязі; E, η, f – значення параметрів ущільнювального середовища по довжині вібротокта в залежності від відносної щільності суміші $(\rho - \rho_0) / (\rho_k - \rho_0)$.

Розв'язання рівняння (39) визначатимемо за таких граничних умов:

$$v(0, t) = u_y(0, t) = \sum_{j=1}^2 A_j(y) \sin(\omega_j t - \psi_j); \quad (40)$$

$$E \frac{\partial v(H, t)}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 v(H, t)}{\partial x \partial t} + f v(H, t) = 0. \quad (41)$$

Функцію $v(x, t)$ подамо у вигляді уявної частини комплексної функції

$$v(x, t) = \sum_{j=1}^2 V_j(x) e^{i(\omega_j t - \psi_j)}, \quad (42)$$

і підставляючи її в рівняння (39), отримаємо рівняння:

$$\sum_{j=1}^2 [(E + i\eta\omega_j) \frac{\partial^2 V_j(x)}{\partial x^2} + f \frac{\partial V_j(x)}{\partial x} + \rho\omega_j^2 V_j(x)] = 0 \quad (43)$$

розв'язання якого подамо у вигляді:

$$\sum_{j=1}^2 V_j(x) = \sum_{j=1}^2 [e^{-\delta_j x} (\Theta_{1j} \sin k_j x + \Theta_{2j} \cos k_j x) e^{i(\omega_j x \vartheta_j)}]. \quad (44)$$

Тоді:

$$v(x, t) = \sum_{j=1}^2 \{ e^{-\delta_j x} (\Theta_{1j} \sin k_j x + \Theta_{2j} \cos k_j x) e^{i[\omega_j(t + \vartheta_j x) - \psi_j]} \}. \quad (45)$$

де Θ_{1j} і Θ_{2j} – комплексні амплітуди; $\delta_j, k_j, \vartheta_j$ – значення фізико-механічних показників оброблюваного середовища, що визначаються за вищенаведеними залежностями зі значеннями елементів E, η, f .

Використовуючи граничні умови (40) і (41), визначимо розв'язання рівняння (39):

$$v(x, t) = \sum_{j=1}^2 \{ A_j(y) e^{-\delta_j x} / [r_{1j}^2 \sin^2(k_j H - \lambda_{3j}) + r_{2j}^2 \sin(k_j H - \lambda_{4j})] \} \{ r_{1j} \sin[k_j(H - x) - \lambda_{3j}] \times \sin[\omega_j(t + \vartheta_j x) - \gamma_j] + r_{2j} \sin[k_j(H - x) - \lambda_{4j}] \times \cos[\omega_j(t + \vartheta_j x) - \gamma_j] \}, \quad (46)$$

де

$$r_{1j} = \sqrt{(Ek_j)^2 (E\delta_j + \nu_j \eta \omega_j^2 - f)^2};$$

$$r_{2j} = \sqrt{(\eta k_j)^2 + (\eta \delta_j - \nu_j E)^2} ;$$

$$\lambda_{3j} = \arctg \frac{Ek_j}{E\delta_j + \nu_j \eta \omega_j^2 - f} ;$$

$$\lambda_{4j} \arctg \frac{\eta k_j}{\eta \delta_j - \nu_j E} ;$$

$$\gamma_j = \psi_j + \arctg \frac{r_{2j} \sin(k_j H - \lambda_{4j})}{r_{1j} \sin(k_j H - \lambda_{3j})}.$$

Напруження, що виникають в оброблюваному шарі асфальтобетону, визначається у разі підстановки виразу (46) в залежність:

$$\sigma(x, t) = E \frac{\partial v}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial t} + f v, \text{ тобто}$$

$$\sigma(x, t) = \sum_{j=1}^2 \{A_j(y) e^{-\delta_j x} [r_{1j}^2 \sin^2(k_j H - \lambda_{3j}) + r_{2j}^2 \sin(k_j H - \lambda_{4j})]\} \{ (r_{2j}^2 - r_{1j}^2) \sin k_j (H - x) \times \sin[\omega_j(t + \nu_j x) - \gamma_j] - 2r_{1j} r_{2j} \sin k_j (H - x) \times \cos(\lambda_{3j} - \lambda_{4j}) \cos[\omega_j(t + \nu_j x) - \gamma_j] \}. \quad (47)$$

Отже, наведеними теоретичними дослідженнями встановлено закони руху вібротка й ущільнювального середовища і визначено напруги, що виникають в асфальтобетонній суміші під час вібраційної обробки з полігармонійним збуджуванням коливань.

Дослідженнями встановлено, що висока якість обробки асфальтобетонних сумішей може бути отримана, якщо амплітуда напружень в основі шару на кінці вібротка дорівнює не менше 80 кПа за товщини шару до 0,1 м і 120 МПа – за товщини шару до 0,2 м. Якість вібраційної обробки асфальтобетонних сумішей суттєво залежить від частоти вібраційного впливу та тривалості його застосування. Зі збільшенням частоти вібраційного впливу показники міцності асфальтобетону збільшуються, а водонасичуваність і необхідна тривалість вібраційного впливу зменшується. Найраціональнішою є обробка асфальтобетонних сумішей вібраційним впливом з частотами $\omega_1 = 152 - 167$ рад/с і $\omega_2 = 304 - 335$ рад/с.

ВИСНОВКИ. У результаті наведених досліджень отримані теоретичні залежності, що дозволяють визначити основні параметри вібраційного обладнання та змодельовати вібраційний процес обробки асфальтобетонних сумішей з метою вибору найраціональнішого режиму вібраційного впливу на оброблюване середовище.

ЛІТЕРАТУРА

1. Марышев Б. С. Асфальтосмесители. *Автомобильные дороги*. № 6 (919), 2008. С. 112–115.
2. Кустарев Г. В., Горшков А. Д. Асфальтосмесительные установки различных типов. Анализ преимуществ и недостатков. *Автомобильные дороги*. №8 (933), 2009. С. 145.
3. Герасимов М. Д., Герасимов Д. М. Определение закона движения, скорости и ускорения центра масс планетарного вибровозбудителя. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2013. № 12. С. 8–1.
4. Маслов А. Г., Саленко Ю. С. Вибрационные машины и процессы в дорожно-строительном производстве: монография. Кременчук: ПП Щербатих О. В, 2014. 262 с.
5. Маслов А. Г. Иткин А. Ф., Саленко Ю. С. Вибрационные машины для приготовления и уплотнения бетонных смесей: монография. Кременчук: ЧП Щербатых А. В, 2014. 324 с.
6. 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.
7. Sudarshan N. M., Chandrashekar R. T. Vibration Impact on Fresh Concrete of Conventional and UHPFRC, *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017. Vol. 12, 8th edn, pp. 1683–1690.
8. Koh H. B., Yeoh D., Shahidan S. Effect of re-vibration on the compressive strength and surface hardness of concrete, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017. Vol. 271, 012057, pp. 1–6.
9. Gutierrez J., Ruiz E., Trochu F. Highfrequency vibrations on the compaction of dry fibrous reinforcements, *Journal of Advanced Composite Materials*, 2013. Vol. 22 (1), pp. 13–27.
10. Maslov A., Batsaikhan J., Puzyr R, Salenko Yu. The Determination of the Parameters of a Vibration Machinef the Internal Compaction of Concrete Mixtures, *International Journal of Engineering & Technology*, 2018. Vol. 7 (4.3), pp. 12–19.
11. Maslov O., Batsaikhan J., Salenko Yu. The Theory of Concrete Mixture Vibratory Compacting, *International Journal of Engineering & Technology*, 2018. Vol. 7 (3.2), pp. 239–244.

STUDY OF THE OPERATING MODE OF THE CONTINUOUS CONCRETE MIXER

Yu. Salenko, R. Vakulenko, A. Shevchuk, A. Lysenko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

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

V. Diatlovska

Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs

vul. Peremogy, 17/6, Kremenchuk, 39605, Ukraine. E-mail: viktoriya.dyat108@gmail.com

Purpose. Providing the theoretical foundations for the development and design of vibratory equipment for the processing of asphalt mixtures. **Methodology.** The proposed continuous asphalt mixing plant includes a power unit with a metering device, an elevator for feeding material to the drying and mixing unit, in which the mineral mixture is heated and evaporation takes place. Heated to operating temperature, the mineral mixture is mixed with bitumen in the mixing compartment of the drying and mixing unit and in this state is fed to the vibrating tray. This mixture has many defective aggregates, consisting of tiny and large particles stuck together, covered with a bitumen film only on the surface of the aggregates and consisting of bitumen droplets and covering shells formed by mineral particles. Using a vibratory tray allows you to destroy the defective aggregates of the mixture and improve the quality of asphalt concrete. **Results.** In the proposed vibratory tray, the mixture is exposed to vibration. The destruction of defective aggregates of the mixture occurs due to the destruction of the surface tension of the binder. The mixture becomes very mobile and compact, and at the vibratory tray exit the edge of the vibratory tray gets it loosened to a conveniently workable condition. The design scheme of a vibratory tray equipped with a low-frequency and high-frequency vibration exciter, which creates a variable amplitude-frequency vibration effect, is presented. **Originality.** The use of vibration exposure contributes to the effective processing of asphalt mixes and at the same time provides an increased quality of asphalt concrete. **Practical value.** Obtaining a high-quality asphalt mixing mixture according to the simplified preparation technology, with less energy costs and greater productivity. **Conclusions.** As a result of the above studies, theoretical dependences are obtained that allow us to determine the main parameters of vibration equipment and simulate the vibration process for processing the asphalt mixtures in order to select the most rational mode of vibration exposure to the medium being treated. References 11, tables 0, figures 2.

Key words: asphalt mixing plant, processing, vibration hammer, vibration impact.

REFERENCES

1. Maryshev, B. (2008), "Asphalt mixers", *Car roads*, № 6 (919), pp. 112–115.
2. Kustarev, G., Gorshkov, A. (2009), "Asphalt mixing plants of various types. Analysis of the advantages and disadvantages", *Car roads*, № 8 (933), 145 p.
3. Gerasimov, M. D., Gerasimov, D. M. (2013), "Determination of the law of motion, speed and acceleration of the center of mass of the planetary vibration exciter", *International journal of applied and fundamental research*, № 12, pp. 8–11.
4. Maslov, A. G., Salenko, Y. S. (2014), "Vibratsionnye mashiny i protsessy v dorozhnoostroitelnom proizvodstve" [Vibrating machines and processes in road construction industry: monography], Kremenchuk, PP Cherbatyh, 262 p.
5. Maslov, A. G., Itkin, A. F., Salenko, Y. S. (2014), "Vibratsionnye mashiny dlya prigotovleniya i uplotneniya betonnykh smesey" [Vibrating machines for the preparation and compaction of concrete mixes], Kremenchuk, PP Cherbatyh, 324 p.
6. Juradin, S., Baloević, G., Harapin, A. (2014), "Impact of Vibrations on the Final Characteristics of Normal and Self-compacting Concrete", *Journal of Materials Research*, Vol. 17(1), pp. 178–185.
7. Sudarshan, N. M., Chandrashekar, R. T. (2017), "Vibration Impact on Fresh Concrete of Conventional and UHPFRC", *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 12, pp. 1683–1690.
8. Koh, H. B., Yeoh, D., Shahidan, S. (2017), "Effect of re-vibration on the compressive strength and surface hardness of concrete", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 271, 012057, pp. 1–6.
9. Gutierrez, J., Ruiz, E., Trochu, F. (2013), "Highfrequency vibrations on the compaction of dry fibrous reinforcements", *Journal of Advanced Composite Materials*, Vol. 22 (1), pp. 13–27.
10. Maslov, A., Batsaikhan, J., Puzyr, R., Salenko, Yu. (2018), "The Determination of the Parameters of a Vibration Machine of the Internal Compaction of Concrete Mixtures", *International Journal of Engineering & Technology*, Vol. 7 (4.3), pp 12–19.
11. Maslov, O., Batsaikhan, J., Salenko, Yu. (2018), "The Theory of Concrete Mixture Vibratory Compacting", *International Journal of Engineering & Technology*, Vol. 7 (3.2), pp 239–244.

Стаття надійшла 20.12.2019.