

## ABSTRACT

Dmytrychenko MF, Vykovich IA, Dyveev BM, IM Vysochan Optimal Designing rods opryskyvateley Application with Dynamic dampers oscillations. // Visnyk NTU. – K.: NTU - 2012. - Vol. 26.

Proanalyzovany optimal methods of design and development of rod opryskyvateley of new methods. Predstavleny discrete kontynualnye dynamics models such machines как shtanhovyy opryskyvatel s prodolhovato shtanhovym element and prysosedynennymy Dynamic dampers oscillations. Poluchennyye suppression algorithms vybratsyy headstay. Predlozhены New Projects vybropohloschayuschye elements.

## РЕФЕРАТ

Дмитриченко М.Ф., Вікович І.А., Дивеев Б.М., Высочан І.М. Оптимальное проектирование штанг опрыскивателей с применением динамических гасителей колебаний. // Вестник НТУ. - К.: НТУ - 2012. - Вып. 26.

Проанализированы методы оптимального проектирования штанговых опрыскивателей и развитие новых методов. Представлены дискретно-континуальные модели динамики таких машин как штанговый опрыскиватель с продолговато штанговым элементом и присоединенными динамическими гасителями колебаний. Полученные алгоритмы подавления вибраций штанги. Предложены новые вибропоглощающие элементы.

УДК 621.01

## РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ І МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У БІТУМО-ЩЕБЕНЕВОМУ АГРЕГАТІ

Дмитриченко М.Ф., доктор технічних наук  
Вікович І.А., доктор технічних наук  
Дубневич О.М.  
Бутитер І.Б.

Вступ. В Україні на дорогах з твердим покриттям переважно 95 ... 96% покладений асфальтобетон. Тому основна кількість і найбільша різноманітність використовуваних і ремонтних матеріалів, машин, технологій і нових розробок пов'язані з якісним нанесенням асфальтобетонних покриттів.

Для укладання на дорогах гарячої асфальтобетонної суміші сьогодні застосовують причіпні і самохідні колісні і гусеничні та комбіновані асфальтоукладчики з різними заданими технічними і технологічними параметрами: великою, середньою і малою продуктивністю та відповідним робочим устаткуванням, шириною укладання від 0,6 до 7 і більше метрів, різною висотою укладання і щільністю, різною транспортною швидкістю, з газовим і електричним та комбінованим підігрівом, з одно- і двошаровим укладанням базового і шару зносу, укладання крупно- і дрібнозернистої та піщаної асфальтобетонної суміші і регульовальними системами параметрів укладання.

Розроблений та виготовлений нами бітумо-щебеневий агрегат призначений для ямкового ремонту доріг шляхом одночасної доставки до місця роботи до 4-х фракцій щебеня і розігрітого рідкого бітуму або бітумної емульсії і створює можливість продувки стисненим повітрям поверхні ремонту та подачі бітуму і щебеню безпосередньо до місця роботи. Може використовуватись при будівельних та ландшафтних роботах, на аеродромах, при розшивці швів та тріщин тощо.

Постановка проблеми. Під час виконання технологічного процесу ямкового ремонту доріг досить часто виникає потреба транспортувати на порівняно великі відстані, на нові ділянки, причіпний бітумо-щебеневий агрегат з розігрітим рідким бітумом.

Залежно від технологічних потреб і умов експлуатації циліндрична горизонтальна ємкість бітумо-щебенєвого агрегату може бути повністю наповнена розігрітим рідким бітумом, менше чи більше половини ємкості, або наповнена рівно наполовину ємкості.

Плавність ходу і стійкість руху транспортних засобів, частково заповнених рідиною, зокрема рідким бітумом (в'язка рідина) погіршується внаслідок зміщення центра ваги рідини (рідкого бітуму) під час коливань особливо в екстремальних режимах руху і на поворотах. Тому проблема щодо

стійкості руху та плавності ходу транспортних засобів, які перевозять різні рідини є не повністю вирішена.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодні недостатньо розроблено і практично відсутні дослідження щодо ефективного функціонування конструкцій машин, призначених для ямкового ремонту доріг, які в Україні застосовуються доволі часто. Тому проектування нової конструкції машини для ямкового ремонту доріг, розроблення моделі і методу розрахунку й аналізу динамічних процесів у бітумо-щебеновому агрегаті та підвищення ефективності функціонування такого агрегату є сьогодні актуальним завданням. Дослідження динамічних процесів у транспортних машинах, частково заповнених рідиною, присвячено ряд робіт [1-5, 7-8, 10-11]. Для вирішення цієї проблеми доцільно розробити нові дещо спрощені підходи.

Виклад основного матеріалу. Бітумо-щебеновий агрегат сконструйований у вигляді чотириколісного причепа на рамі якого у центральній частині розміщена ємкість для бітуму, а з обох боків бункери для щебеню.

Бітумо-щебеновий агрегат має торсіонну підвіску, що дає змогу досить швидко та плавно рухатись на нерівній дорозі та зберігати необхідну стійкість під час транспортування.

На рис. 1 штриховою лінією показано наповнення циліндричної горизонтально розміщеної ємкості бітумо-щебенового агрегату розігрітим рідким бітумом висотою  $h_0$ ; ( $h_0=R$ ;  $h_0<R$  і  $h_0>R$ ,  $R$ —радіус циліндричної ємкості) і показано сили, які прикладені у центрі маси рідкого бітуму під час коливань.

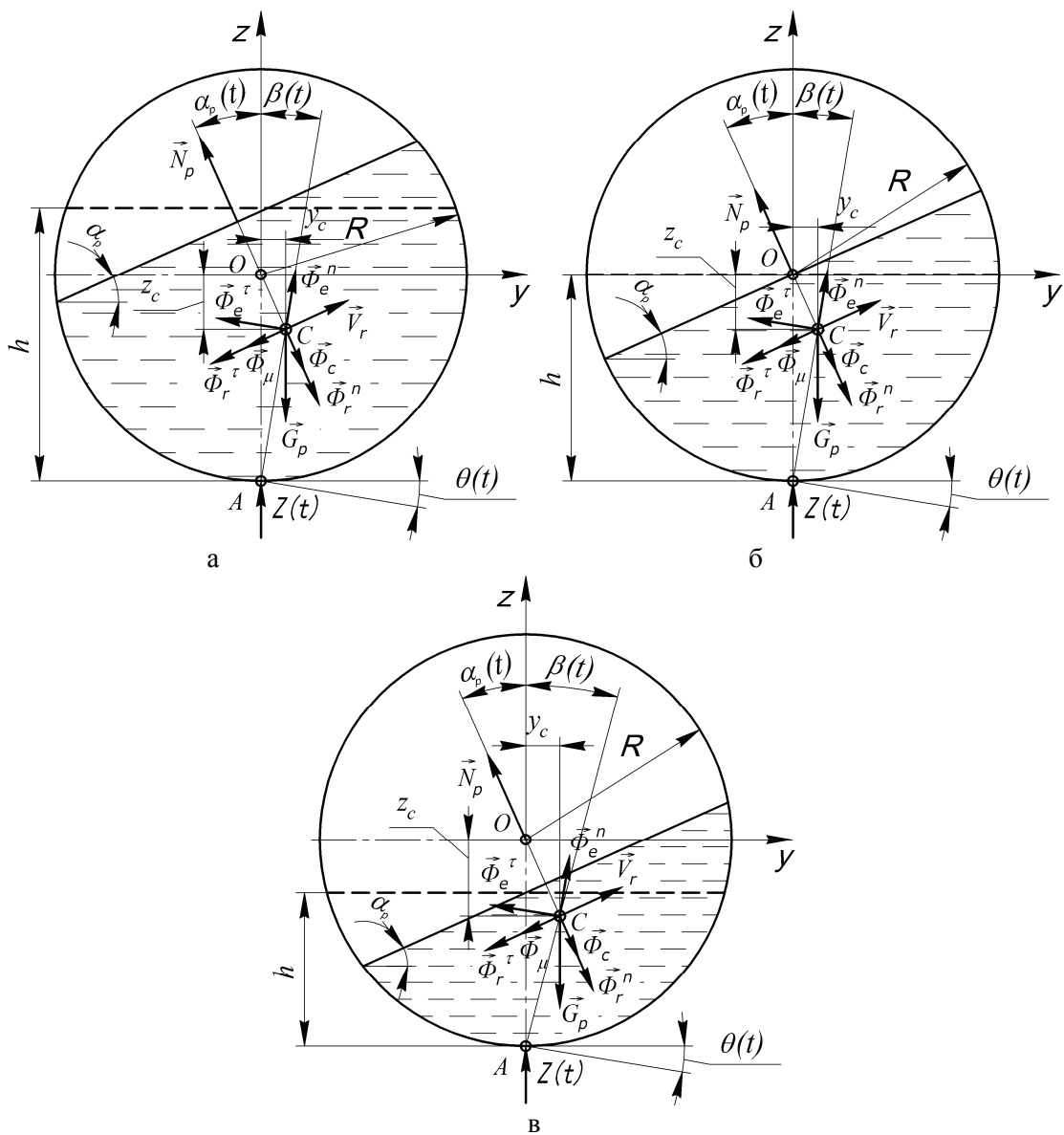


Рис. 1. Схема сил, які діють у центрі мас розігрітого рідкого бітуму у частково заповненій циліндричній горизонтальній ємкості бітумо-щебенового агрегату в процесі його поперечних коливань

Припустимо, що під час поперечних коливань бітумо-щебеневого агрегату розігрітий рідкий бітум у циліндричній горизонтальній ємкості буде нахилений під деяким кутом  $\alpha_p(t)$  до горизонту (розглядається лінійний характер збурених коливань рідкого бітуму) [4]. Визначимо, при цьому, положення центра маси  $C$  рідкого бітуму відносно початку координат  $O$  координатних осей  $Oy$ ,  $Oz$  у поперечній площині циліндричної горизонтальної ємкості, радіус якої дорівнює  $R$  (рис. 1).

Координати центра маси рідкого бітуму визначимо, за умови “затверділого” бітуму, як координати центра ваги сегмента (сектора без його трикутника) для трьох випадків (рис. 1а, 1б, 1в) якщо висота  $h$  наповнення циліндричної ємкості бітумом відповідно буде:

$$1. h > R; 2. h = R; 3. h < R. \quad (1)$$

Відстань  $OC$  (рис. 1б), яка визначає положення центра маси рідкого бітуму наповненого в циліндричній горизонтальній ємкості наполовину ( $h=R$ , де центральний кут сектора  $\varphi_s = \pi$ ) визначимо за відомою формулою:

$$OC = \frac{2}{3} R \frac{\sin \frac{\varphi_s}{2}}{\frac{\varphi_s}{2}} = \frac{4}{3\pi} R, \quad (\varphi_s = \pi \text{ для } h=R) \quad (2)$$

Для випадку, коли  $h < R$  (рис. 1в) відстань  $OC$  положення центра маси сегмента  $C$  визначиться з умови, як визначається положення центра ваги складних фігур (сектора без його трикутника) за формулою не об'ємів, а площ, оскільки поперечний переріз не змінюється вздовж осі  $x$ :

$$OC = \frac{F_s z_s - F_\Delta z_\Delta}{F_s - z_\Delta} = \frac{2}{3} \frac{a_s h_s^2 - 2R^3 \sin \frac{\varphi_s}{2}}{R^2 \varphi_s - a_s h_s}, \quad (3)$$

де  $F_s$  і  $F_\Delta$  та  $z_s$  і  $z_\Delta$  – площі та вертикальні координати відповідно сектора і трикутника, який разом із сегментом є сектором;  $h_s$  – висота трикутника,  $a_s$  – довжина хорди сегмента.

Відповідно для випадку, коли  $h < R$  аналогічно визначимо вертикальну координату положення центра ваги сегмента:

$$OC = \frac{2}{3} \frac{a_s h_s^2 - 2R^3 \sin \frac{\varphi_s}{2}}{2\pi R^2 - R^2 \varphi_s + a_s h_s}, \quad (4)$$

Загалом довжина хорди  $a_{si}$  – відповідних сегментів залежно від наповнення бітумом циліндричної горизонтальної ємкості бітумо-щебеневого агрегату

$$a_{si} = 2\sqrt{h_i(2R - h_i)},$$

причому висоти відповідних умовних секторів:  $h_s=0$ ,  $h_s=R-h$  і  $h_s=h-R$ , а центральні кути відповідних секторів, які стягують відповідні довжини хорд  $a_{si}$  сегментів під час коливань рідкого бітуму

$$\varphi_{si} = \arcsin \frac{\sqrt{h_i(2R - h_i)}}{R}.$$

Координати центра маси рухливості рідкого бітуму під час коливань відносно системи координат  $Oz$ у будуть:

$$y_{ci} = 0c_i \sin \alpha_p; \quad z_{ci} = 0c_i \cos \alpha_p, \quad (5)$$

де координати положення центрів ваг відповідних секторів  $O_{ci}$  визначаємо за рівнянням (2), (3) і (4). Розглянемо найхарактерніший випадок, коли горизонтальна циліндрична ємкість бітумо-щебеневого агрегату наповнена розігрітим рідким бітумом більше ніж на половину.

Внаслідок вертикальних і кутових поперечних коливань циліндричної горизонтальної ємкості, частково заповненої рідким бітумом, нормальна реакція  $N$  рідкого бітуму (рис. 1, 2) зрівноважується вагою рідкого бітуму  $G_p$ , переносною  $\Phi_{ei}$ , відносною  $\Phi_{ri}$  і коріолісовою  $\Phi_{ci}$  силами інерції.

Використовуючи принцип Германа-Ейлера-Даламбера прикладемо у центрі мас розігрітого рідкого бітуму вектори переносної  $\Phi_{ei}$ , відносної  $\Phi_{ri}$  і коріолісової  $\Phi_{ci}$  сил інерції, нормальну реакцію рідкого бітуму  $N_{pb}$ , вагу рідкого бітуму  $G_p$ , силу інерції, викликану вертикальним кінематичним збуренням  $z(t)$  та вектор сили опору руху  $\Phi_{\mu}$ , зумовлений загалом внутрішнім в'язким тертям і тертям до стінок ємкості рідкого бітуму з деякими його узагальненим коефіцієнтом в'язкості  $\mu$ , який пропорційний швидкості переміщення центра маси рідкого бітуму вздовж його поверхні і спроекуємо вектори усіх сил відповідно на осі  $z$  і  $y$ , запишемо рівняння динамічної рівноваги:

$$-m_p(g + \ddot{z}) + \Phi_{ei}^n \cos \beta + \Phi_{ei}^r \sin \beta - \Phi_{ri}^n \cos \alpha_p - \Phi_{ri}^r \sin \alpha_p - \Phi_{ci} \cos \alpha_p + N_p \cos \alpha_p - \Phi_{\mu} \sin \alpha_p = 0; \quad (6)$$

$$\Phi_{ei}^n \sin \beta + \Phi_{ei}^r \cos \beta + \Phi_{ri}^n \sin \alpha_p - \Phi_{ri}^r \cos \alpha_p + \Phi_{ci} \sin \alpha_p - N_p \sin \alpha_p - \Phi_{\mu} \cos \alpha_p = 0, \quad (7)$$

де  $m_p$  – маса розігрітого рідкого бітуму у циліндричній горизонтальній ємкості бітумо-щебеневого агрегату  $\left(m_p = \frac{G_p}{g}\right)$ ;  $m_r$  – активна рухома частина маси рідкого бітуму  $\left(m_r = \frac{1}{2} l_p R^2 \alpha_p\right)$ ;  $l_p$  –

довжина циліндричної ємкості бітумо-щебеневого агрегату;  $\Phi_{ei}^n = m_p AC \ddot{\theta} = m_p \frac{R - z_{ci}}{\cos \beta} \ddot{\theta}$ ;

$$\Phi_{ei}^r = m_p AC \dot{\theta} = m_p \frac{R - z_{ci}}{\cos \beta} \dot{\theta}; \quad \Phi_{ri}^n = m_r 0c_i \omega_{ri}^2 = m_r 0c_i \alpha_p^2; \quad \Phi_{ri}^r = m_r \varepsilon_{ri} = m_r 0c_i \ddot{\alpha}_p;$$

$$\Phi_{ci} = 2m_r \dot{\alpha}_p \dot{\alpha}_p = 2m_r 0c_i \dot{\alpha}_p \ddot{\alpha}_p; \quad \Phi_{\mu} = \mu_r V_{ri} = \mu_r 0c_i \alpha_p^2; \quad \omega_{ri} = \frac{V_{ri}}{0c_i} = \alpha_p; \quad V_{ri} = \sqrt{\dot{x}_{ci}^2 + \dot{y}_{ci}^2} = 0c_i \alpha_p;$$

$$z_{ci} = 0c_i \cos \alpha_p(t); \quad y_{ci} = 0c_i \sin \alpha_p(t).$$

Враховуючи, що  $N_p \cos \alpha_p = N_z$  і  $N_p \sin \alpha_p = N_y$  та  $AC = \frac{R - z_{ci}}{\cos \beta}$  з рівнянь (6) і (7)

визначаємо відповідно  $N_z$  і  $N_y$ :

$$N_z = m_p(g + \ddot{z}) - m_p \alpha_{pR} \ddot{\theta} - m_p \alpha_{pR} \dot{\theta} \dot{\beta} + m_r \alpha_p^2 z_{ci} + m_r \alpha_p \dot{\alpha}_p y_{ci} + 2m_r \dot{\alpha}_p \ddot{\alpha}_p z_{ci} + \mu_r \alpha_p \dot{\alpha}_p y_{ci}; \quad (8)$$

$$N_y = m_p \alpha_{pR} \dot{\theta} \dot{\beta} - m_p \alpha_{pR} \ddot{\theta} + m_r \alpha_p^2 y_{ci} - m_r \alpha_p \dot{\alpha}_p z_{ci} + 2m_r \dot{\alpha}_p \ddot{\alpha}_p y_{ci} - \mu_r \alpha_p \dot{\alpha}_p z_{ci}, \quad (9)$$

де  $\alpha_{pR} = R - 0c_i \cos \alpha_p$ .

Для знаходження закону коливань, у поперечно-вертикальній площині, розігрітого рідкого бітуму у циліндричній ємкості бітумо-щебеневого агрегату у вигляді функції кута нахилу рідкого бітуму до горизонту  $\alpha_p(t)$  необхідно з рівнянь (6) і (7) виключити нормальну реакцію рідини  $N$ .

Для цього помножимо рівняння (6) на  $\sin \alpha_p$ , а рівняння (7) на  $\cos \alpha_p$  і складемо ці рівняння та після перетворень одержимо закон коливань рідкого бітуму у циліндричній горизонтальній ємкості у поперечно-вертикальній площині у вигляді:

$$\begin{aligned}
 & m_{rc} \ddot{\alpha}_p \cos 2\alpha_p - m_{rc} \dot{\alpha}_p^2 \sin 2\alpha_p - m_p \ddot{\alpha}_p \sin \alpha_p + m_p \alpha_{pR} (\operatorname{tg} \beta \sin \alpha_p + \cos \alpha_p) \ddot{\theta} \\
 & - m_p \alpha_{pR} (\operatorname{tg} \beta \cos \alpha_p - \sin \alpha_p) \dot{\theta}^2 + 2m_{rc} \dot{\alpha}_p \dot{\theta} \sin 2\alpha_p + \mu_{rc} \dot{\alpha}_p \dot{\theta} \cos 2\alpha_p - m_p g \sin \alpha_p = 0,
 \end{aligned} \tag{10}$$

де  $m_{rc} = m_p 0c_i$ ;  $\mu_{rc} = \mu_r 0c_i$ .

Для розв'язання загалом задачі про коливання підресореного причіпного бітумо-щебеневого агрегату у поперечно-вертикальній площині під час його руху, зумовленого нерівностями дороги з урахуванням впливу рухливості розігрітого рідкого бітуму, частково заповненого у його циліндричній горизонтальній ємкості, будемо адекватну розрахункову схему, яка показана на рис. 2.

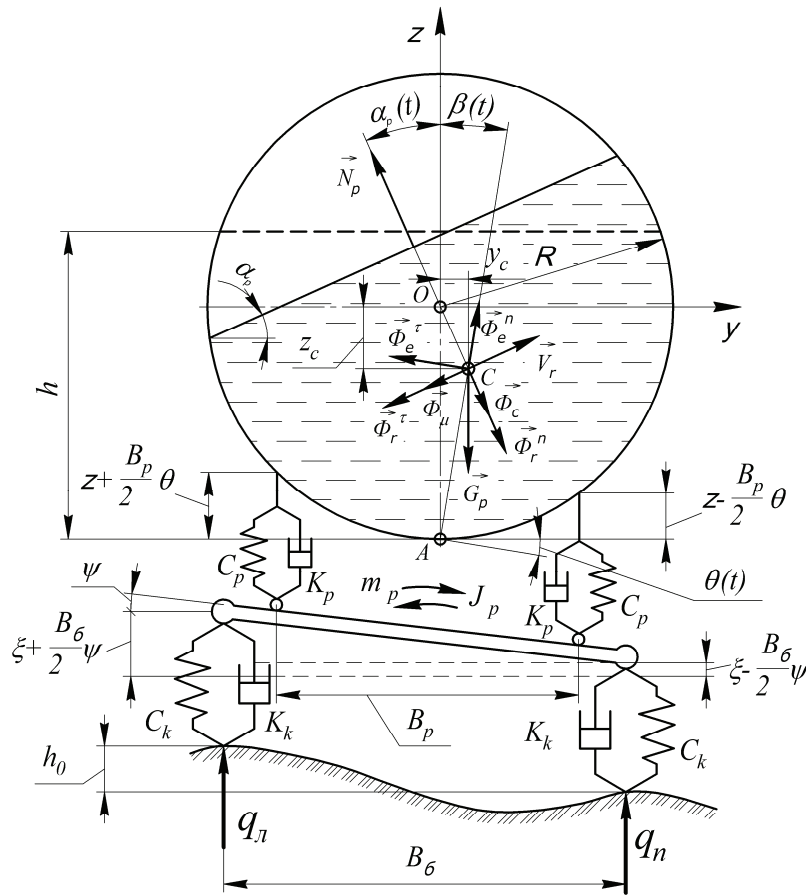


Рис. 2. Розрахункова схема коливань у поперечно-вертикальній площині причіпного бітумо-щебеневого агрегату, частково заповненого розігрітим рідким бітумом у його циліндричній горизонтальній ємкості

Відповідно до розрахункової схеми (рис. 2) складемо нелінійні диференційні рівняння, які описують коливальний процес у поперечно-вертикальній площині причіпного бітумо-щебеневого агрегату частково заповненого розігрітим рідким бітумом у його циліндричній горизонтальній ємкості у вигляді:

$$\begin{aligned}
 & M \ddot{\xi} + 2k_p \left[ \xi + \frac{B_p}{2} \theta - \left( \xi + \frac{B_0}{2} \psi \right) \right] + 2k_p \left[ \xi - \frac{B_p}{2} \theta - \left( \xi - \frac{B_0}{2} \psi \right) \right] + \\
 & + 2c_p \left[ \xi + \frac{B_p}{2} \theta - \left( \xi + \frac{B_0}{2} \psi \right) \right] + 2c_p \left[ \xi - \frac{B_p}{2} \theta - \left( \xi - \frac{B_0}{2} \psi \right) \right] + N_z = 0;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& I_{\delta} + 2k_p \left[ z + \frac{B_p}{2} \theta - \left( \xi + \frac{B_{\delta}}{2} \psi \right) \right] \frac{B_p}{2} - 2k_p \left[ z - \frac{B_p}{2} \theta - \left( \xi - \frac{B_{\delta}}{2} \psi \right) \right] \frac{B_p}{2} + \\
& + 2c_p \left[ z + \frac{B_p}{2} \theta - \left( \xi + \frac{B_{\delta}}{2} \psi \right) \right] \frac{B_p}{2} - 2c_p \left[ z - \frac{B_p}{2} \theta - \left( \xi - \frac{B_{\delta}}{2} \psi \right) \right] \frac{B_p}{2} + N_z y_{ci} - N_y (h - z_{ci}) = 0; \\
& m_p \xi + 2k_k \left[ \xi + \left( \frac{B_{\delta}}{2} \psi - q_{II} \right) \right] + 2k_k \left[ \xi - \left( \frac{B_{\delta}}{2} \psi - q_{II} \right) \right] - \\
& - 2k_p \left[ z + \frac{B_p}{2} \theta - \left( \xi + \frac{B_{\delta}}{2} \psi \right) \right] - 2k_p \left[ z - \frac{B_p}{2} \theta - \left( \xi - \frac{B_{\delta}}{2} \psi \right) \right] + \\
& + 2c_k \left[ \xi + \left( \frac{B_{\delta}}{2} \psi - q_{II} \right) \right] + c_k \left[ \xi - \left( \frac{B_{\delta}}{2} \psi - q_{II} \right) \right] - \\
& - 2c_p \left[ z + \frac{B_p}{2} \theta - \left( \xi + \frac{B_{\delta}}{2} \psi \right) \right] - 2c_p \left[ z - \frac{B_p}{2} \theta - \left( \xi - \frac{B_{\delta}}{2} \psi \right) \right] = 0; \\
& I_p \psi + 2k_k \left[ \xi + \left( \frac{B_{\delta}}{2} \psi - q_{II} \right) \right] \frac{B_{\delta}}{2} - 2k_k \left[ \xi - \left( \frac{B_{\delta}}{2} \psi - q_{II} \right) \right] \frac{B_{\delta}}{2} + \\
& + 2c_k \left[ \xi + \left( \frac{B_{\delta}}{2} \psi - q_{II} \right) \right] \frac{B_{\delta}}{2} - 2c_k \left[ \xi - \left( \frac{B_{\delta}}{2} \psi - q_{II} \right) \right] \frac{B_{\delta}}{2} - \\
& - 2k_p \left[ z + \frac{B_p}{2} \theta - \left( \xi + \frac{B_{\delta}}{2} \psi \right) \right] \frac{B_p}{2} + 2k_p \left[ z - \frac{B_p}{2} \theta - \left( \xi - \frac{B_{\delta}}{2} \psi \right) \right] \frac{B_p}{2} - \\
& - 2c_p \left[ z + \frac{B_p}{2} \theta - \left( \xi + \frac{B_{\delta}}{2} \psi \right) \right] \frac{B_p}{2} + 2c_p \left[ z - \frac{B_p}{2} \theta - \left( \xi - \frac{B_{\delta}}{2} \psi \right) \right] \frac{B_p}{2} = 0,
\end{aligned} \tag{11}$$

де  $M = m_{\delta} + m_p$  – підресорена маса бітуму-щебеневого агрегату  $m_{\delta}$  разом з розігрітим рідким бітумом  $m_p$ ;  $k_p$ ,  $k_k$  і  $c_p$ ,  $c_k$  – коефіцієнти в'язкості і жорсткості відповідно підвіски бітумо-щебеневого агрегату і коліс;  $z$ ,  $\xi$  і  $\theta$ ,  $\psi$  – вертикальні і кутові переміщення циліндричної горизонтальної ємкості з частково заповненим рідким бітумом на підвісці і відповідно коліс причіпного бітумо-щебеневого агрегату;  $I_{\delta}$ ,  $m_p$  – зведений момент інерції системи “тіло-рідина” стосовно поздовжньої його осі і маса моста бітумо-щебеневого агрегату;  $y_{ci}$  і  $z_{ci}$  – координати центра мас розігрітого рідкого бітуму стосовно центра 0 циліндричної горизонтальної ємкості причіпного бітумо-щебеневого агрегату;  $q_{II}$  і  $q_{II}$  – збурення від нерівностей дороги під лівими і правими колесами причіпного бітумо-щебеневого агрегату;  $N_y$  і  $N_z$  – складові реакції відповідно на осі  $y$  і  $z$ , що діють на стінки циліндричної ємкості бітумо-щебеневого агрегату в процесі коливань розігрітого рідкого бітуму і які визначаються з рівнянь (8) і (9) та (10).

Рівняння (11) з урахуванням виразів для  $N_x$  і  $N_z$  та інерційних сил після перетворень набере вигляду:

$$\begin{aligned}
& (M + m_p) \ddot{\xi} + 4k_p (\ddot{z} - \ddot{\xi}) + 4c_p (z - \xi) - m_p \alpha_{pR} \operatorname{tg} \beta \ddot{\theta} - \\
& - m_p \alpha_{pR} \ddot{\theta} + 2m_r \ddot{z}_{ci} + m_r \ddot{y}_{ci} + m_r \alpha_p^2 \ddot{z}_{ci} + \mu_r \alpha_p \ddot{y}_{ci} + m_p \ddot{y}_{ci} = 0; \\
& I_{\delta} \ddot{\psi} - m_p \alpha_{pR} [\operatorname{tg} \beta y_{ci} + (h - z_{ci})] \ddot{\theta} - m_p \alpha_{pR} [y_{ci} + \operatorname{tg}(h - z_{ci})] \ddot{\theta} + \\
& + 2m_r y_{ci} [z_{ci} + (h - z_{ci})] \ddot{\theta} - m_r [y_{ci}^2 - z_{ci}(h - z_{ci})] \ddot{\theta} - \\
& - m_r y_{ci} [z_{ci} + (h - z_{ci})] \alpha_p^2 + \mu_r [y_{ci}^2 - z_{ci}(h - z_{ci})] \alpha_p + m_p \ddot{y}_{ci} + m_p g y_{ci} + \\
& + k_p B_p^2 \ddot{\theta} + c_p B_p^2 \dot{\theta} - k_p B_{\delta} B_p \psi = 0;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
m_p \ddot{z} + 4(k_k + k_p)\dot{z} + 4(c_k + c_p)\dot{\xi} - 4c_p z &= 2k_k(\varphi_k - \varphi_{II}) + 2c_k(q_{II} - q_I); \\
I_0 \ddot{\varphi} + (B_0 k_k + B_p k_p)B_0 \dot{\varphi} + (B_0 c_k + B_p c_p)B_0 \psi - B_p^2 k_p \varphi &= B_0 k_k(\varphi_k - \varphi_{II}) + B_0 c_k(q_{II} - q_I). \quad (12)
\end{aligned}$$

Збурення від нерівностей дороги під лівими і правими колесами переважно для практичних розрахунків наближено подають у вигляді:

$$q_{II} = h_0(1 - \cos vt); \quad q_I = h_0(1 - \sin vt); \quad v = \frac{2\pi}{S}V, \quad (13)$$

де  $v$  – частота збурення (чергування нерівностей дороги);  $S$  та  $h_0$  – довжина хвилі та половина висоти нерівностей профілю дороги.

Останні два рівняння системи (12) з урахуванням (13) наберуть вигляду:

$$\begin{aligned}
m_p \ddot{z} + 4(k_k + k_p)\dot{z} + 4(c_k + c_p)\dot{\xi} - 4k_p z - 4c_p z &= \\
= 2h_0 k_k v(\sin vt + \cos vt) + 2h_0 c_k(\sin vt - \cos vt); \\
I_0 \ddot{\varphi} + (B_0 k_k + B_p k_p)B_0 \dot{\varphi} + (B_0 c_k + B_p c_p)B_0 \psi - B_p^2 k_p \varphi &= \\
= B_0 h_0 v k_k(\sin vt + \cos vt) + B_0 h_0 c_k(\sin vt - \cos vt). \quad (14)
\end{aligned}$$

Очевидно, що систему нелінійних диференціальних рівнянь (12) з урахуванням (14) у сукупності з (10) можна розв'язати тільки числовим методом. Для цього подано цю систему нелінійних диференціальних рівнянь у зручному для числового розв'язку вигляді, ввівши при цьому заміну:  $\ddot{z} = z_1$ ;  $\dot{z} = z_1$ ;  $\ddot{\xi} = \theta_1$ ;  $\dot{\xi} = \theta_1$ ;  $\ddot{\varphi} = \alpha_{p1}$ ;  $\dot{\varphi} = \alpha_{p1}$ ;  $\ddot{\xi} = \xi_1$ ;  $\dot{\xi} = \xi_1$ ;  $\ddot{\psi} = \psi_1$ ;  $\dot{\psi} = \psi_1$ ;

$$\begin{cases}
a_{11} \dot{z}_1 - a_{12}(\alpha_p) \theta_1^2 + a_{15}(\alpha_p) = b_1(z, z_1, \theta_1, \theta_1^2, \xi, \xi_1, \psi, \psi_1, \alpha_p, \alpha_{p1}, \alpha_{p1}^2, \theta_1, vt); \\
a_{21} \dot{z}_1 + a_{22}(\alpha_p) \theta_1^2 - a_{25}(\alpha_p) \alpha_{p1} = b_2(\theta, \theta_1, \theta_1^2, \psi, \psi_1, \alpha_p, \alpha_{p1}, \alpha_{p1}^2); \\
a_{33} \dot{\xi}_1 = b_3(z, z_1, \xi, \xi_1, vt); \\
a_{44} \dot{\psi}_1 = b_4(\theta_1, \psi, \psi_1, vt); \\
a_{51}(\alpha_p) \dot{z}_1 - a_{52}(\alpha_p) \theta_1^2 - a_{55}(\alpha_p) \alpha_{p1} = b_5(\theta_1, \theta_1^2, \alpha_p, \alpha_{p1}, \alpha_{p1}^2),
\end{cases} \quad (15)$$

де  $a_{11} = M + m_p$ ;  $a_{12}(\alpha_p) = m_p \alpha_{pR} \operatorname{tg} \beta$ ;  $a_{15} = m_r y_{ci}$ ;

$$a_{21} = m_p y_{ci}; \quad a_{22}(\alpha_p) = I_0 - m_p \alpha_{pR} [\operatorname{tg} \beta y_{ci} + (h - z_{ci})];$$

$$a_{25} = m_r [y_{ci}^2 - z_{ci}(h - z_{ci})];$$

$$a_{33} = m_p; \quad a_{44} = I; \quad a_{51}(\alpha_p) = m_p \sin \alpha_p; \quad a_{52}(\alpha_p) = m_p \alpha_{pR} (\operatorname{tg} \beta \sin \alpha_p + \cos \alpha_p);$$

$$a_{55}(\alpha_p) = m_{rc} \cos 2\alpha_p;$$

$$\begin{aligned}
b_1(z, z_1, \theta_1, \theta_1^2, \xi, \xi_1, \psi, \psi_1, \alpha_p, \alpha_{p1}, \alpha_{p1}^2, \theta_1, vt) &= m_p \alpha_{pR} \theta_1^2 - 2m_r z_{ci} \theta_1 \alpha_{p1} - \\
&- m_r z_{ci} \alpha_{p1}^2 - \mu_r y_{ci} \alpha_{p1} - 4k_p(z_1 - \xi_1) - 4c_p(z - \xi) - m_p y_{ci};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
b_2(\theta, \theta_1, \theta_1^2, \psi, \psi_1, \alpha_p, \alpha_{p1}, \alpha_{p1}^2) &= m_p \alpha_{pR} [y_{ci} + \operatorname{tg} \beta (h - z_{ci})] \theta_1^2 \\
&- 2m_r y_{ci} \theta_1 \alpha_{p1} + m_r y_{ci} h \alpha_{p1}^2 - \mu_r [y_{ci} - z_{ci}(h - z_{ci})] \alpha_{p1} - k_p B_p^2 \theta_1 - \\
&- c_p B_p^2 \theta + k_p B_0 \psi_1 + c_p B_0 B_p \psi - m_p g y_{ci};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
b_3(z, z_1, \xi, \xi_1, vt) &= 2 \left\{ 2 \left[ k_p z_1 + c_p z - (k_k + k_p) \xi_1 - (c_k + c_p) \xi \right] + \right. \\
&\left. + h_0 [k_k v(\sin vt z + \cos vt) + c_k(\sin vt - \cos vt)] \right\};
\end{aligned}$$

$$b_4(\theta_1, \psi, \psi_1, vt) = B_p^2 k_p \theta_1 - B_\sigma \{ (B_\sigma k_k + B_p k_p) \psi_1 + (B_\sigma c_k + B_p c_p) \psi - \\ - h_0 [k_k v (\sin vt + \cos vt) + c_k (\sin vt - \cos vt)] \};$$

$$b_5(\theta_1, \theta_1^2, \alpha_p, \alpha_{p1}, \alpha_{p1}^2) = m_{rc} \alpha_{p1}^2 \sin 2\alpha_p + m_p \alpha_{pR} (\operatorname{tg} \beta \cos \alpha_p - \sin \alpha_p) \theta_1^2 - \\ - 2m_{rc} \theta_1 \alpha_{p1} \sin 2\alpha_p - \mu_{rc} \alpha_{p1} \cos 2\alpha_p + m_p g \sin \alpha_p;$$

Висновки. Отже, розроблена нами динамічна модель і запропонований підхід дає змогу проводити аналіз динамічних процесів у причіпному бітумо-щебеновому агрегаті з торсіонною підвіскою з урахуванням рухливості розігрітого рідкого бітуму у його циліндричній горизонтальній ємкості у поперечно-вертикальній площині, вибирати раціональні параметри цього агрегату для підвищення ефективності функціонування загалом.

Перспективи подальших досліджень. Доцільно у подальшому провести аналіз динамічних процесів у бітумо-щебеновому агрегаті на основі числового розв'язування системи нелінійних диференціальних рівнянь (15). Також бажано провести натурні експериментальні дослідження бітумо-щебенового агрегату та порівняти їх з теоретичними.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Богоряд И.Б., Дружинин И.Ф., Дружинин Г.З., Либин Э.И. Введение в динамику сосудов с жидкостью.–Томск. Изд-во Томского ун-та, 1977.–144 с.
2. І.А. Вікович, О.М. Дубневич, М.М. Осташук. Модель і метод розрахунку динамічних процесів у причіпному бітумо-щебеновому агрегаті з незалежною торсіонною підвіскою з урахуванням рухливості розігрітого рідкого бітуму//Укр. міжвід. науково-техн. зб.–Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні.–Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2010.–Вип. 44.–С. 46-52.
3. Гузь А.Н. Динамика сжимаемой жидкости (обзор)//Прикл. мех.–2000.–36, №1.–С. 25-52.
4. Дмитриченко М.Ф., Вікович І.А. Динаміка мобільних машин з начіпними функціональними елементами: Монографія.–Львів: Вид-во НУ “Львівська політехніка”, 2008.–496 с.
5. Дмитриченко М.Ф., Вікович І.А., Дубневич О.М. Аналіз динамічних процесів у причіпному бітумо-щебеновому агрегаті з незалежною однавальною підвіскою//Вісн. Національного транспортного університету.–К.
6. Лобанов Н.В. Моделирование торсионной подвески гусеничных транспортных средств//Вестник РГРТУ.–Вып.23.–Рязань, 2008.–С. 45-47.
7. Луковский И.А. Введение в нелинейную динамику твердого тела с полостями, содержащих жидкость.–К.: Наук. думка, 1990.–296 с.
8. Мойсеев Н.Н., Румянцев В.В. Динамика тела с полостями, содержащими жидкость.–М.: Наука, 1995.–440 с.
9. Панков Ю.П. Применение ЭВМ для определения оптимальных конструктивных параметров торсионно-пружинной подвески и исследования колебаний прицепа//Автомобильная промышленность.–№1, 1995.–С. 16-19.
10. Филатов А.Н. О динамическом действии жидкости на цистерну при произвольном ускорении//Труды ин-та матем. и механики АН УзССР.–Ташкент, 1957.–Вып. 21.–107-111.
11. Черноусько Ф.Л. Движение твердого тела с полостями, содержащими вязкую жидкость. М.: ВЦ АН СССР, 1968.–183 с.

#### РЕФЕРАТ

Дмитриченко М.Ф., Вікович І.А., Дубневич О.М., Бутитер І.Б. / Розроблення моделі і методу розрахунку динамічних процесів у бітумо-щебеновому агрегаті. // Вісник НТУ. – К.: НТУ – 2012. – Вип. 26.

Розроблено математичну модель коливань бітуму-щебенового агрегату з торсіонною підвіскою з урахуванням рухливості розігрітого рідкого бітуму у його циліндричній горизонтальній ємкості у поперечно-вертикальній площині.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** БІТУМО-ЩЕБЕНЕВИЙ АГРЕГАТ, ДИНАМІЧНИЙ ПРОЦЕС.

#### ABSTRACT

Dmytrychenko MF, Vikovych IA Dubnevych OM Butyter IB / The development of the model and calculation method of dynamic processes in bitumen macadam-aggregate. // Visnyk NTU. – K.: NTU - 2012. - Vol. 26.

A mathematical model of oscillations of bitumen, crushed stone aggregate with torsion bar suspension based mobility heated liquid bitumen in its horizontal cylindrical tanks in transverse vertical plane.

**KEY WORDS:** bit-crushed stone aggregates, dynamic process.



## РЕФЕРАТ

Дмитриченко М.Ф., Викович І.А., Дубневич О.М., Бутитер І.Б. / Разработка модели и метода расчета динамических процессов в битум-щебеночном агрегате. // Вестник НТУ. - К.: НТУ - 2012. - Вып. 26.

Разработана математическая модель колебаний битума-щебеночного агрегата с торсионной подвеской с учетом подвижности разогретого жидкого битума в его цилиндрической горизонтальной емкости в поперечно-вертикальной плоскости.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: БИТУМА-ЩЕБЕНОЧНОГО АГРЕГАТ, ДИНАМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС.

УДК 621.891

### ВПЛИВ ШВИДКОСТІ КОЧЕННЯ НА ДИНАМІКУ ФОРМУВАННЯ МАСТИЛЬНОГО ШАРУ

Дмитриченко М.Ф., доктор технічних наук

Куш О.І., кандидат технічних наук

Туриця Ю.О., кандидат технічних наук

Постановка завдання. Виходячи з еластогідродинамічної теорії мащення, товщина мастильного шару суттєво залежить від сумарної швидкості кочення  $V_y$  при дотриманні постійності всіх інших умов, особливо температури. Нажаль, в літературі відсутні дані про розрахунок товщини мастильного шару при низьких пускових швидкостях кочення, а саме за таких умов роботи пар тертя відбувається інтенсивний знос елементів трибоспряжень [1].

Метою роботи є визначення товщини мастильного шару в контактні в умовах кочення з проковзуванням при несталіх умовах роботи та встановлення впливу швидкості кочення на динаміку формування масляного шару оливи. В якості матеріалів для досліджень застосовувались оливи BS-80, I-40, PAO-8 при контактних напругах 100 і 700 МПа.

Основна частина. Проведені випробування для визначення товщини плівки проводились методом падіння напруги в режимі нормального тліючого розряду в умовах пусків (4 с) – зупинок (3 с) при збільшенні сумарної швидкості кочення до 2,5 м/с. При дослідженні мастильних матеріалів були отримані криві залежностей зміни товщини мастильного шару зі збільшенням сумарної швидкості кочення контактуючих поверхонь (рис.1) для олив марок BS-80, I-40, PAO-8 при контактних напругах 100 і 700 МПа.

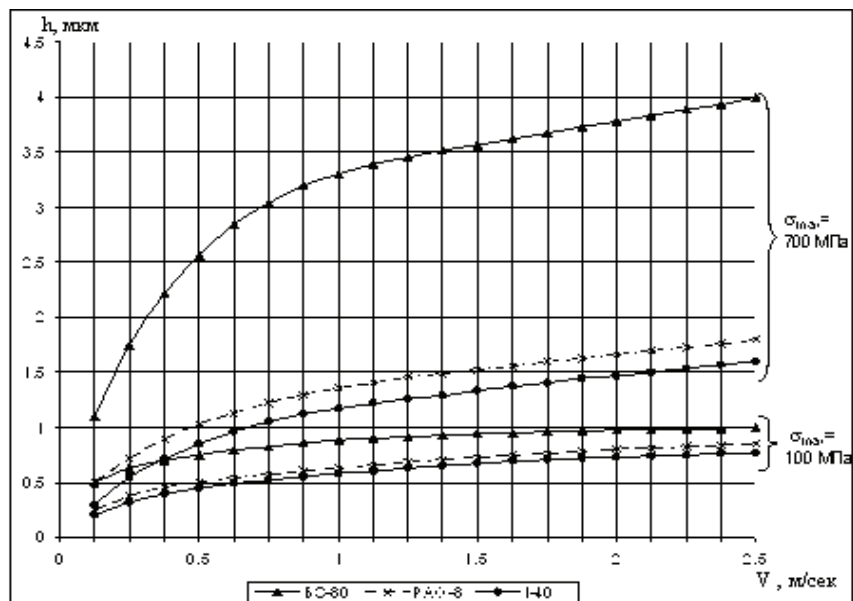


Рисунок. 1. – Зміна товщини мастильного шару  $h$  в залежності від сумарної швидкості кочення (проковзування – 15%)  $V_y$  (при  $\sigma_{\text{маз}} = 100$  МПа – товщина вимірювалась інтерференційним методом, при  $\sigma_{\text{маз}} = 700$  МПа – методом ПН в режимі НТР)