

## ДИНАМІЧНА ВЗАЄМОДІЯ РОЛИКОВИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ З БЕТОННОЮ СУМІШШЮ

Стефан Зайченко

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", 03056, вул. Борщагівська 115, корпус 22, Київ, Україна

## DYNAMIC INTERACTION OF ROLLER WORKING WITH CONCRETE MIX

Stefan Zaichenko

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", 03056, Borshchagovskaya st., 115, build 22, Kyiv, Ukraine

**АНОТАЦІЯ.** Розглянуті концепції і основні моделі течії бетонних сумішей. Використана модель в'язко-пластичного середовища Бінгама, що дозволяє врахувати додаткові складові опори бетонної суміші, які викликані динамічними навантаженнями робочих органів при формуванні кільцевого кріплення підземної споруди.

**Ключові слова:** в'язкість, швидкість, пластичність, деформації, роликоче формування.

**АННОТАЦИЯ.** Рассмотрены концепции и основные модели течения бетонных смесей. Использована модель вязко-пластической среды Бингама, что позволяет учесть дополнительные составляющие сопротивления бетонной смеси, вызванные динамическими нагрузками рабочих органов при формировании кольцевого крепления подземного сооружения.

**Ключевые слова:** вязкость, скорость, пластичность, деформации, роликоче формование.

**SUMMARY. Purpose.** The installation behavior with dynamic mix of roller working groups on environment emerging in the construction of ring designs to set the dependence distribution of contact pressures given loading rates. **Methodology/approach.** A mixture of a stressed-tying-plastic medium that shows its basic properties depending on the mode of action on it. Using the known model Bininga defined relationship between the stress of concrete mix and the conditions of its contact with the working body. **Findings.** It is resolved differential equations changes the normal contact pressure concrete mixture on your body. **Research limitations/implications.** The model of a visco-plastic medium Bingham to allow for additional components of the resistance of concrete due to dynamic loads of working bodies in the formation of the annular attachment of the underground facilities. **Originality/value.** The article is one of the steps further research.

**Key words:** strength, speed, flexibility, deformation, roller molding.

### Вступ

В процесі виготовлення будівельної конструкції бетонна суміш зазнає два етапи: заповнення певного об'єму, приймаючи певну форму і ущільнення в заданому об'ємі. Залежно від обраної технології роликоче формування данні процеси можуть бути суміщені у випадку формування з утворенням "язика" ущільнення [1] і рознесені у просторі для випадку послідовного ущільнення з попереднім вібраційним або безвібраційним ущільненням бетонної суміші. Як в першому так і другому випадках процес роликоче ущільнення відбувається шляхом циклічної дії роликоче робочого органа на бетонну суміш, що викликає в суміші нормальні і дотичні напруження, які складають більше  $0,5\text{MPa}$ . Внаслідок великих лінійних  $\epsilon$  і кутових деформацій  $\gamma$ , які складають більше  $>0,05$  і  $>0,1$ , суміш проявляє свої пластичні властивості у зоні навантаження. Матеріал переходить в пластичний стан.

В загальному випадку плоского напруженого стану неможливо встановити умови пластичності для нескінченної множини

співвідношень між складовими напруженнями. Тому умови пластичності встановлюють на основі гіпотез з наступною експериментальною перевіркою [2, 3].

При дослідженні контактної взаємодії роликоче робочих органів з середовищем, що оброблюється, бетонна суміш представлена моделями: пружною моделлю Гука [4, 5], жорстко-пластичною Кулона-Мора [5-7]. Особливістю даних моделей є незалежність поведінки матеріалу від швидкості деформацій і часу прикладення навантаження. Умовою використання даних моделей є той факт, що середня швидкість руху робочих органів бетоноформуючих агрегатів складає в межах 1,5 м/с. З метою підвищення продуктивності, швидкість руху робочих органів при формуванні кільцевих конструкцій може перевищувати 5 м/с, що викличе додаткові напруження у середовищі, які викликані в'язкими властивостями бетонної суміші.

Особливість виникнення додаткового опору пов'язаного зі збільшенням швидкостей навантаження не дозволяє використовувати отримані раніше залежності для ви-

рішення контактної задачі взаємодії роликів робочих органів з бетонною сумішшю.

#### Мета і завдання дослідження

Встановлення поведінки суміші при динамічній дії роликів робочих органів на середовище, що формується в умовах зведення кільцевої конструкції, яка дозволяє встановити залежність розподілу контактних тисків з урахуванням швидкостей навантаження.

#### Виклад основного матеріалу

Бетонна суміш представляє собою полідисперсне середовище, яке складається з зерен крупного і дрібного заповнювача, які в ідеальному випадку покриті цементним гелем. В загальному випадку суміш є пружно-в'язко-пластичне середовище, яке проявляє свої основні властивості залежно від способу дії на нього [8, 9]. Основні пластичні властивості бетонної суміші пов'язані з взаємодією зерен заповнювача. При динамічному навантаженні бетонна суміш проявляє свої в'язкі властивості, які пов'язані з властивостями цементного гелю, реологічні параметри якого можливо описати за допомогою в'язкого тіла Ньютона ( $N$ ). Сумісну поведінку зерен заповнювача і цементного гелю можливо змодельювати за допомогою в'язко-пластичної моделі Бінгама ( $B$ ) без врахування пружної складової Гука  $H$ :

$$B = (N|StV),$$

де  $N$  - тіло Ньютона;  $StV$  - тіло Сен-Венана.

Експериментальні дослідження процесу навантаження рихлої бетонної суміші свідчать про прояву пружних деформацій при тисках менших  $10\text{КПа}$ , що значно менше тисків які виникають під час роликового формування, що дозволяє не враховувати пружну складову на етапі навантаження.

Модель Бінгама багаторазово експериментально підтверджена при моделюванні процесу формування будівельних конструкцій [8, 10-12] і може бути представлена для умов роликового формування наступним виразом:

$$\tau_s = \tau_n + \tau_\epsilon, \quad (1)$$

де  $\tau_n$  - складова опору зсуву, яка зумовле-

на пластичними властивостями суміші;  $\tau_\epsilon$  - складова опору зсуву, яка зумовлена в'язкими властивостями суміші.

В'язкі властивості середовища в моделі Бінгама представлені тілом Ньютона, яке описується рівнянням:

$$\tau_\epsilon = \mu\dot{\gamma}, \quad (2)$$

де  $\mu$  - динамічна в'язкість бетонної суміші;  $\dot{\gamma}$  - швидкість пластичної деформації.

Опір  $\tau_n$  зсуву бетонної суміші залежить від стану ущільнення суміші [5-7] і дії нормального тиску, що дозволяє використати модель Кулона-Мора:

$$\tau_n = \sigma_x \text{tg} \varphi_{\text{тер}} + \tau_0(y), \quad (3)$$

де  $\sigma_x$  - нормальний тиск;  $\varphi_{\text{тер}}$  - коефіцієнт тертя;  $\tau_0(y)$  - початковий граничний дотичний тиск.

Початковий граничний дотичний тиск залежить від ступеня ущільнення бетонної суміші і змінюється ортогонально як за напрямом перекошування по дузі захоплення  $\varphi_x$ , так і вздовж осі обертання ролика  $y$ . Зміна початкового граничного дотичного тиску по дузі захоплення  $\varphi_x$ , з врахуванням лінійної зміни міцності від мінімального насипного значення  $\tau_{\text{нас}}$  до максимального значення граничного дотичного тиску відформованого виробу  $\tau_{\text{вир}}(y)$  для даної точки осі обертання ролика  $y$ :

$$\tau_0(y) = \frac{\tau_{\text{нас}} - \tau_{\text{вир}}(y)}{\varphi} \varphi_x + \tau_{\text{вир}}(y), \quad (4)$$

де  $\varphi$  - кут захоплення суміші.

Значення граничного дотичного тиску відформованого виробу  $\tau_{\text{вир}}(y)$  залежить від ступні ущільнення по довжині ролика  $(y)$  і може бути представлена рівнянням:

$$\tau_{\text{вир}}(y) = \tau_k + \nu K(y),$$

де  $\nu$ ,  $\tau_k$  - коефіцієнти пропорційності.

$K(y)$  - ступінь ущільнення бетонної суміші.

Після підставлення (2-4) в (1) і перетворень динамічний граничний опір зсуву  $\tau_s^0$ :

$$\tau_s^d = \sigma_x \operatorname{tg} \varphi_{\text{тер}} + \frac{\tau_{\text{нас}} - \tau_{\text{вир}}(y)}{\varphi} \varphi_x + \tau_{\text{вир}}(y) + \mu \dot{\gamma} \quad (5)$$

Отримана залежність дозволяє визначити динамічний граничний опір зсуву  $\tau_s^d$  за умови відомих зовнішніх чинників дії, які представлені нормальним тиском  $\sigma_x$  і швидкістю пластичних деформацій  $\dot{\gamma}$ .

Визначимо швидкість пластичних деформацій  $\dot{\gamma}_{xy}$  у елементі, який являє собою стовпчик суміші шириною  $dx$  (рис. 1). Пластичні деформації при плоско-

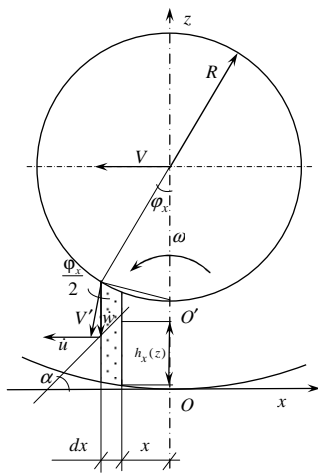


Рис. 1. Схема визначення розподілу деформації середовища

Fig. 1. Chart of determination of distribution of deformation of environment

деформованому стані у площині  $XOZ$ :

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z},$$

де  $w$  - переміщення вздовж осі  $OZ$  (вертикальні);  $u$  - переміщення вздовж осі  $OX$  (вертикальні).

Відповідно швидкість пластичних деформацій:

$$\dot{\gamma}_{xz} = \frac{\partial \dot{w}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{u}}{\partial z}.$$

Для визначення часткових похідних швидкостей  $\dot{w}$  і  $\dot{u}$  по  $x$  і  $z$  визначимо залежність розподілу швидкостей в плоскості  $XOZ$ . Кочення робочого колеса з лінійною швидкістю  $V$  являє собою обертання навколо миттєвого центра обертання з коловою швидкістю  $\omega_R = V/R$ . Швидкість руху

точки обода  $\dot{w}$  з координатою  $x$  ( $\varphi_x$ ):

$$\dot{w} \approx \omega \cdot x \cdot \cos\left(\frac{x}{2R}\right) \approx \omega \cdot R \varphi_x.$$

Враховавши, що кут  $\varphi_x \approx x/R$ , вертикальна складова швидкості руху точки обода  $\dot{w}$ :

$$\dot{w} \approx \omega \cdot x.$$

Вертикальна складова переміщень  $w$  нижніх шарів стовпчика суміші в наслідок підсилення масивом гірської породи практично не має вертикального переміщення. Аналіз експериментальних даних дослідження зміни величини переміщень по висоті у пластичному середовищі свідчать про близький до експоненціального характеру зміни і для умов роликового формування може бути представлений у вигляді:

$$\dot{w}(h) = \frac{\omega x}{e^{1-h_x(z)/h_x}}.$$

Для усередненого значення швидкості по висоті  $\bar{\dot{w}}$ :

$$\bar{\dot{w}} = \omega x (1 - e^{-1}).$$

Для опису процесу пластичної деформації можливо застосувати умови пластичності Треска-Сен-Венана, яке полягає у тому, що пластичні деформації в матеріалі виникають, коли максимальні напруження досягають значення, що дорівнює межі текучості  $\tau_s$ :

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2\tau_s,$$

де  $\sigma_1, \sigma_3$  - головні напруження середовища (рис. 2).

При дослідженні припускається, що вісі головних напружень спрямовані паралельно осям координат, при цьому  $\sigma_z = \sigma_1$  і  $\sigma_x = \sigma_3$ . Орієнтація площадки по якій відбувається зсув визначається кутом  $\alpha$  і дорівнює  $\pi/4$  (рис. 2). Дане припущення використано в роботах К. Л. Johnson, Т. Karman, А.А.Ильюшина, А. И. Целікова, В. П. Полухіна для дослідження контактних задач взаємодії жорсткого індентора з пластичним середовищем.

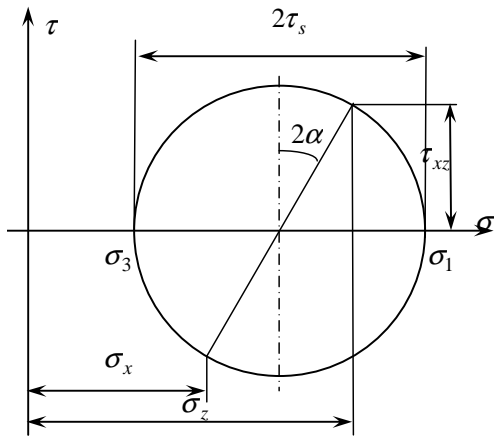


Рис.2. Коло напружень при плоскому деформованому стані  
 Fig. 2. The strains circle in flat deformed state

Орієнтація площини зсуву під кутом  $\alpha = \pi/4$  дозволяє визначити відношення векторів швидкостей:

$$\frac{\dot{u}}{\dot{w}} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

Враховував встановлені залежності значень швидкостей  $\dot{u}$  і  $\dot{w}$  вздовж осей  $OX$  і  $OZ$  середня швидкість кутової деформації  $\bar{\dot{\gamma}}_{xz}$ :

$$\bar{\dot{\gamma}}_{xz} = 2\omega(1 - e^{-1}).$$

Встановлення середньої швидкості пластичної деформації  $\bar{\dot{\gamma}}_{xz}$  дозволяє визначити в'язку складову динамічного граничного опору зсуву:

$$\tau_e = 2\mu\omega(1 - e^{-1}).$$

Динамічна в'язкість бетонної суміші на основі моделі Ейнштейна [13] залежить від структурного стану полідисперсної системи, однією з основних характеристик на етапі ущільнення є концентрація частинок твердої фази. Реологічні моделі зв'язують лінійно або близько дволінійної в'язкість з концентрацією частинок твердої фази. Зміна густини бетонної суміші по дузі контакту  $\phi_x$  має наступний характер:

$$\rho(\phi_x) \sim k_1 + k_2 \phi_x.$$

Тому за аналогією з розподілом граничного опору зсуву, зміна динамічної в'язкості бетонної суміші має вигляд

$$\mu = \frac{\mu_{нас} - \mu_{вир}(y)}{\phi} \phi_x + \mu_{вир}(y),$$

де  $\mu_{нас}$  - в'язкість рихлої суміші;

$\mu_{вир}(y)$  - в'язкість суміші для точки осі обертання ролика з координатою  $y$ .

З врахуванням отриманої залежності розподілу динамічного граничного опору зсуву  $\tau_s$  по площі контакту диференційні рівняння зміни нормального контактного тиску роликів робочого органа [6, 7] з бетонною сумішшю набувають вигляду:

$$d(p_x - 2\tau_s^d) =$$

$$I, = \left( 2\tau_s^d - p_x \left( \mu + \xi \left( \operatorname{tg} \left( \arcsin \frac{R \sin \phi_x}{R_e} \right) + \mu_e \right) \right) \right) \frac{dh_n}{h_x};$$

II,

$$d(p_x - 2\tau_s^d) =$$

$$= \left( 2\tau_s^d + p_x \left( \mu - \xi \left( \operatorname{tg} \left( \arcsin \frac{R \sin \phi_x}{R_e} \right) - \mu_e \right) \right) \right) \frac{dh_n}{h_x};$$

$$\frac{dp_x}{d\phi_x} = \frac{1}{h_x} (p_x (1 - \beta)) \sin \phi_x -$$

$$III, -2\beta p_x \left( -\mu + \xi \left( \operatorname{tg} \left( \arcsin \frac{R \sin \phi_x}{R_e} \right) - \mu_e \right) \right) \times \\ \times \cos \phi_x \left[ R \sin \phi_x - \frac{R^2 \cos \phi_x}{\sqrt{R_e^2 - (R \sin \phi_x)^2}} \right].$$

Початкові умови для точки початку взаємодії ролика з середовищем  $\phi_x = \phi$  є умова пластичного деформування суміші  $p(\phi) = 2\tau_s$ . На рисунка 3 і 4 представлені епюри розподілу нормальних контактних тисків за однакових умов при використанні пластичної моделі і в'язко-пластичної моделі середовища.

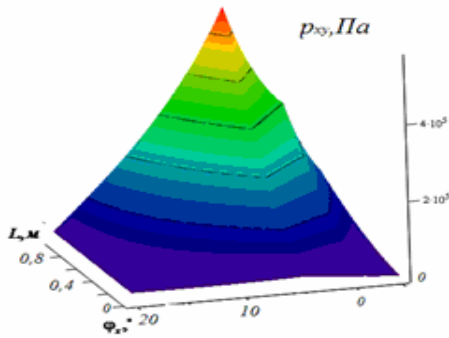
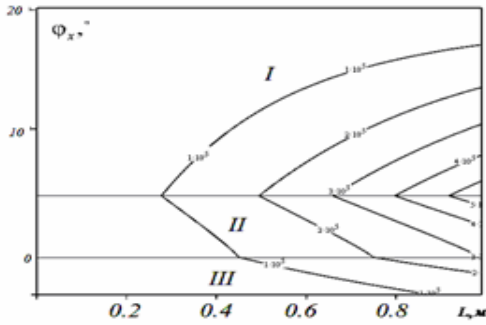


Рис. 3 Зміна контактної тиску при пластичній моделі бетонної суміші  
Fig. 3. The change contact pressure at plastic models of concrete mix

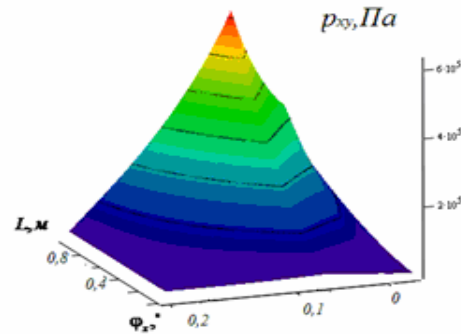
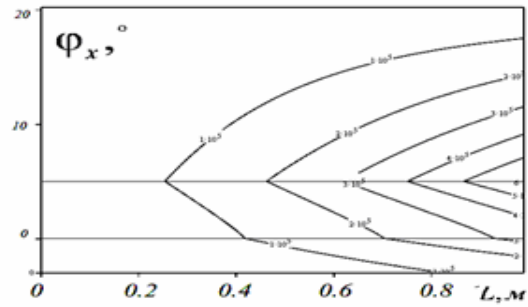


Рис. 4 Зміна контактної тиску при в'язко-пластичній моделі бетонної суміші  
Fig. 4. The change contact pressure at viscoplastic model concrete mix

Очевидно, що напруження, які виникають у в'язко-пластичному середовищі при її динамічному навантаженні, будуть більшими, що викличе збільшення значень розподілу нормальних контактних тисків.

Різка зміна значення теоретичного розподілу нормальних контактних тисків не характерне для дійсного розподілу, що пояснюється прилипанням і поступовою зміною коефіцієнта тертя в зоні максимальних тисків. Також вирішені диференціальні рівняння зміни нормального контактного тиску не враховують рух бетонної суміші вздовж осі обертання робочого органа у зоні максимальних тисків в кінці процесу формування, що призведе до зменшення контактних тисків.

### Висновки

Визначення закономірностей розподілу нормальних тисків при динамічному впливі роликів робочих органів на бетонну суміш дозволяє встановити основні енергосилові параметри процесу роликів формування кільцевого кріплення тунелю з урахуванням в'язких властивостей бетонної

суміші.

### Література

1. Гарнець В. М. Прогресивні бетоноформуючі агрегати і комплекси [Текст] / В. М. Гарнець. - К. : Будівельник, 1991. - 145 с.
2. Работнов Ю. Н. Сопротивление материалов / Ю. Н. Работнов. - М.: Физматгиз, 1963. — 456 с.
3. Самуль В. И. Основы теории упругости и пластичности: Учеб. пособие для студентов вузов. — 2-е изд., перераб. — М.: Высш. школа, 1982. — 264 с.
4. Шинкаренко В.И. Совершенствование процессов роликів формування мелкозернистых бетонных смесей: Дис. канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1989. – 305 с.
5. Контактна взаємодія робочих органів безвібраційних бетоноформуючих агрегатів при виробництві пустотних панелей: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.05.02 / С.В. Зайченко; Київ. нац. ун-т будва і архіт. — К., 2001. — 19 с.
6. Зайченко С.В. Контактна взаємодія роликів робочих органів при формуванні кільцевої конструкції /С.В. Зайченко, С.П. Шевчук, В.М. Гарнець // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини: наук. - техн.

- зб. - 2011. - Вип 78. - С. 52-59.
7. *Ловейкін В.С.* Визначення контактних тисків взаємодії формуючих робочих органів прохідницького щита з оброблюваним середовищем /В.С.Ловейкін, С.В. Зайченко, С.П. Шевчук // Науковий збірник ТДАТУ: наук. - техн. зб. - 2011. – Вип. 1., т. 3 - С. 272-283.
  8. *Ахвердов И. Н.* Основы физики бетона. — М.: Стройиздат, 1981. - 464 с.
  9. *Рейнер М.* Десять лекций по теоретической реологии [Текст] / М.Рейнер; Пер. с англ. М.П.Воларовича, А.М.Гуткина; Под общ. ред. М.П.Воларовича. - М.-Л. : [б. и.], 1947. - 134 с.
  10. *Гусев Б.В.* Вибрационная технология бетона /Гусев Б.В., Зазимко В.Т. //Киев: Будівельник, 1991, 160 с.
  11. *Евтюков, С.А.* Построение механореологических моделей процессов взаимодействия рабочих органов строительно-дорожных машин со средой: учеб. пособие / С.А. Евтюков, А.А. Овчаров, И. В. Замаараев; СПбГАСУ. – СПб., 2011. – 59 с.
  12. *Кононов В.Н.* Теоретические основы повышения эксплуатационных качеств асфальтобетонных покрытий дорожных одежд городских улиц и дорог: Дис. докт. техн. наук: 05.23.14. / Москва, 1983. – 290 с.
  13. *Бибик Е. Е.* Реология дисперсных систем / Е. Е Бибик // Вестник ЛГУ. -1981,- С. 172.
- References**
1. *Garnets V.M.*, 1991. Progressive betonoformuyuchi aggregates and complexes [Progressive concrete forming aggregates and complexes]. Kyiv, Budivel'nik Publ., 145.
  2. *Rabotnov Y.N.*, 1963. Soprotivlenie materialov [Resistivity of materials]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 456.
  3. *Samul V.I.*, 1982. Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti: Ucheb. posobie dlja studentov vuzov. 2-e izd., pererab [Fundamentals elasticity theory and plasticity. Textbook for students of high schools. 2nd ed., Rev]. Moscow, Vishha shkola Publ., 264.
  4. *Shynkarenko V.I.*, 1989. Sovershenstvovanie procesov rolkovogo formovaniya melkozernistyh betonnyh smesey. Dis. kand. tehn. nauk [Improvement roller molding processes fine grain concrete mixture. Candidate of tech. sci. diss. man.]. Dnepropetrovsk, 305.
  5. *Zaichenko S.V.*, 2001. Kontaktna vzacmodija robochih organiv bezvibracijnih betonoformujuchih agregativ pri virobniectvi pustotnih panelej. Avtoref. dis. kand. tehn. nauk [Contact interaction of working without vibration concrete forming aggregates in the production of hollow panels. Candidate of tech. sci. diss. man.]. Kyiv, 19.
  6. *Zaichenko S.V.*, 2011. Kontaktna vzacmodija rolkovih robochih organiv pri formuvanni kilcevoї konstrukcii [Contact interaction roller working bodies in the formation of ring structures]. Girnichi, budivelni, dorozhni ta meliorativni mashini [Mining, construction, road and meliorative machines], no.78, 52-59.
  7. *Loveykin V.S. Zaichenko S.V., Shevchuk S.P.*, 2011. Vznachennja kontaktnih tiskiv vzacmodii formujuchih robochih organiv prohidnic'kogo shhita z obroblyvanim seredovishhem [Determination of contact pressures interact forming working groups of the shield tunnel with the work environment]. Naukovij zbirnik TDAU [Scientific Journal TDAU], no. 1, vol. 3, 272-283.
  8. *Ahverdov J. H.*, 1981. Osnovy fiziki betona [Fundamentals of physics concrete]. Moscow, Strojizdat Publ., 464.
  9. *Rayner M.*, 1947. Desjat lekcij po teoreticheskoj reologii [Ten lectures on theoretical rheology]. St. Petersburg, 134.
  10. *Gusev B.V.*, 1991. Vibracionnaja tehnologija betona [Vibration technology of concrete]. Kiev, Budivel'nik Publ., 160.
  11. *Evyukov S. A.*, 2011. Postroenie mehano-reologicheskikh modelej processov vzaimodejstvija robochih organov stroitelno-dorozhnyh mashin so sredoj [The construction mechanical rheological models the interaction of the working bodies of road construction machines with a medium]. St. Petersburg, SPb Publ., 59.
  12. *Kononov V.N.*, 1983. Teoreticheskie osnovy povysenija ekspluatacionnyh kachestv asfalto-betonnyh pokrytij dorozhnyh odezhd gorodskih ulic i dorog. Dis. dr. tehn. nauk [The theoretical basis for improving the performance of asphalt pavement of city streets and roads. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, 290.
  13. *Bibik E.E.*, 1981. Reologija dispersnyh sistem [Rheology of disperse systems]. Vestnik LGU [Journal LSU], 172.

Надійшла до редакції  
17.12.2012 р.

Затверджена до друку  
24.12.2012 р.