УДК 622.232.5.05

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ РОЛИКОВОГО РОБОЧОГО ОРГАНА З ОБРОБЛЮВАНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ ПРИ ФОРМУВАННІ ЗАТРУБНОГО ПРОСТОРУ ТУНЕЛЮ

С. В. Зайченко, канд. техн. наук (НТУУ "КПІ")

Розглянуто питання створення тунелю прохідницькими щитами (машинами з роторним робочим органом). Встановлено закономірності зміни нормальних і дотичних контактних тисків між роликовими робочими органами та пластичним середовищем.

Ключові слова: контактний тиск, деформація, опір зсуву, тунель.

Рассмотрены вопросы создания тоннеля проходческими щитами (машинами с роторным рабочим органом). Установлены закономерности изменения нормальных и касательных контактных давлений между роликовыми рабочими органами и пластической средой.

Ключевые слова: контактное давление, деформация, сопротивление сдвигу, туннель.

Problems of tunnel construction by means of tunneling machines are considered. Regularities of the normal and tangential contact pressures changes between the roller working members and the plastic medium are set.

Key words: contact pressure, deformation, shearing resistance, tunnel.

Вступ. Одним з основних напрямів, які сприяють інтенсифікації робіт будівництва перегінних тунелів метрополітенів і колекторних тунелів, є застосування прохідницьких щитів, що дає можливість різко збільшити темпи будівництва і зменшити трудовитрати [1]. Традиційна схема будівництва тунелю передбачає монтаж тюбінгового кріплення безпосередньо у просторі прохідницького щита і подальше трудомістке первинне і контрольне нагнітання піщаного розчину з високим вмістом цементу за кріплення тунелю з метою ліквідації зазору між кріпленням і ґрунтом [2].

Зазначеного недоліку можна позбутися шляхом застосування роликового методу формування для утворення по периметру кільцевого оброблення шару дрібнозернистого бетону, який має необхідні сталі фізико-механічні і геометричні параметри [3].

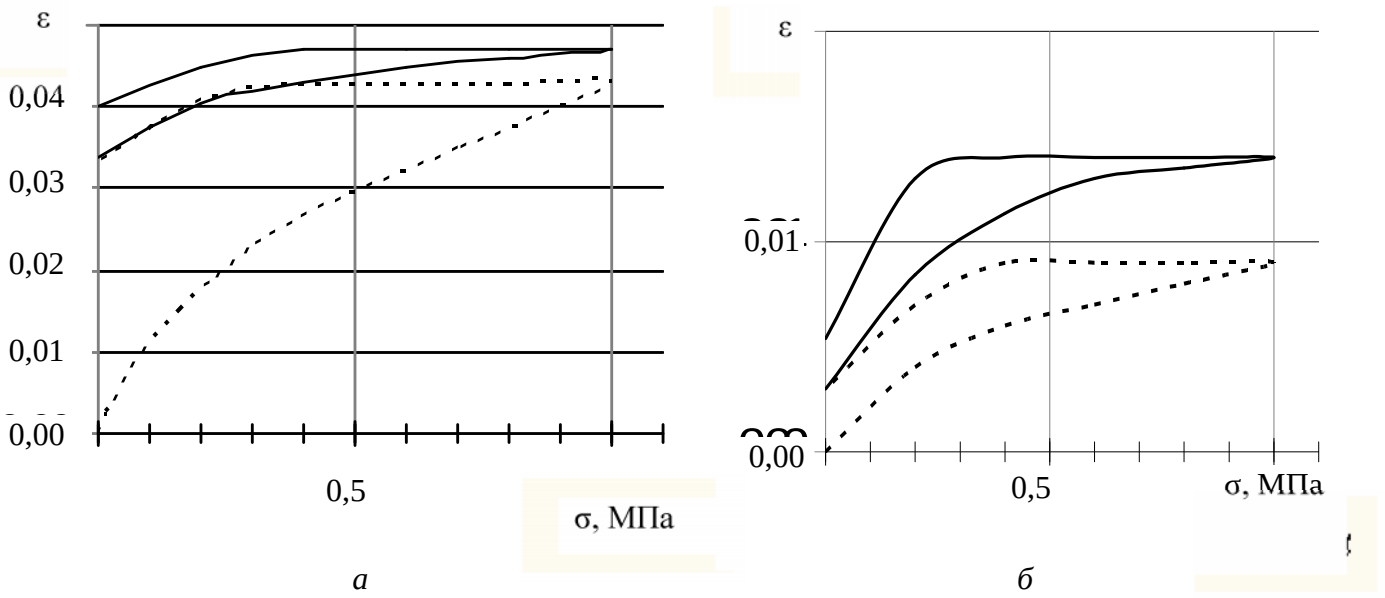
Для створення машин, в основу яких покладено принцип роликового формування, необхідно визначити сили опору середовища при дії на нього роликових робочих органів. Реакція оброблюваного середовища на формуючий орган визначає характер і інтенсивність контактних тисків, які виникають внаслідок ущільнення суміші.

Аналіз стану проблеми. Питанню залежності напружень, що виникають у будівельних сумішах, від величини їх деформації при ущільненні роликовим робочим органом присвячено ряд робіт, в яких властивості середовища представлені емпіричними величинами, а простір середовища представлено півплощиною, підсиленою жорсткою плоскою основою [4–6]. Використання отриманих результатів не дозволяє з достатньою точністю визначити

енергосилові параметри процесу формування затрубного простору тунелю внаслідок різної геометрії деформівного шару і підсилюючої жорсткої основи.

Мета роботи. Для визначення з високою точністю енергосилових параметрів процесу роликового формування затрубного простору необхідно встановити контактні тиски взаємодії роликових робочих органів з оброблюваним середовищем при формуванні затрубного простору тунелю з урахуванням геометричних параметрів процесу формування трибологічних і деформаційних властивостей оброблюваного середовища.

Матеріали і результати досліджень. Стан суміші змінюється з часом під впливом циклічних навантажень, які створюють роликові формуючі робочі органи. Процес дії циклічних навантажень на оброблюване середовище супроводжується виникненням необоротної і оборотної деформації навантаження. Оборотна деформація зникає після дії робочого органа, необоротна залишається. Аналіз діаграм деформації оброблюваного середовища на основі гірських порід з в'яжучим під дією навантажень свідчить, про те, що суміш в основному проявляє свої пластичні властивості (рис. 1).



а *б*

Рис. 1. Залежності деформації від напружень при компресійних дослідженнях бетонної суміші: *а* – $K_{уп} = 0{,}82$; *б* – $K_{уп} = 0{,}96$ (··· перше навантаження; — друге навантаження)

Процес роликового формування суміші супроводжується циклічними повторними навантаженнями оброблюваного середовища. При повторних навантаженнях суміш ущільнюється, при цьому відбувається зменшення пружної складової деформації (рис. 1).

Враховуючи викладене вище, для опису властивостей середовища можна запропонувати жорстко пластичну модель середовища:

$$\tau_s = \mathrm{tg}\varphi_{тер} \cdot p_x + \tau_0 , \qquad (1)$$

де τ_s – граничний опір зсуву; $\varphi_{тер}$ – кут внутрішнього тертя; p_x – нормальний тиск; τ_0 – початковий граничний дотичний тиск.

При роликовому формуванні суміші відбувається зміцнення матеріалу в результаті його ущільнення. Завдяки цьому зростає величина граничного опору зсуву τ_0. Причиною такого росту є порушення первинної структури бетонної суміші. В залежності від характеру тиску ці порушення пов'язані або з ущільненням суміші, зменшенням пор і збільшенням поверхні контакту зерен, або з утворенням тріщин в суміші. Для кожного моменту ущільнення граничний опір зсуву τ_s залежить від нормального тиску p_x і буде відповідно змінюватись. В процесі ущільнення суміш змінює значення початкового граничного опору зсуву тиску τ_0. Мінімальне значення τ_0 має пухка суміш, а максимальне значення – після n проходів роликів. Інтенсивність процесу ущільнення суміші пов'язана з ростом контактних тисків, які виникають у середовищі під час формування. Оскільки при контактній взаємодії роликових робочих органів існує максимальне значення контактного тиску, яке відповідає нейтральній точці, зона максимального ущільнення суміші також знаходиться в даній точці. Таким чином, можна стверджувати, що початковий граничний опір зсуву набуде свого максимального значення у нейтральній точці контактної взаємодії.

Тому для роликового формування суміші було запропоновано, що початковий граничний опір зсуву τ_0 змінюється лінійно по дузі захоплення від мінімального насипного значення $\tau_{нас}$ до максимального значення дотичного тиску відформованого виробу $\tau_{вир}$:

$$\tau_0 = \frac{\tau_{нас} - \tau_{вир}}{\varphi - \gamma_н}(\varphi_x - \gamma_н) + \tau_{вир}. \qquad (2)$$

З урахуванням виразу (2) рівняння для граничного опору зсуву τ_s набуває вигляду

$$\tau_s = \mathrm{tg}\varphi_{тер} \cdot p_x + \frac{\tau_{нас} - \tau_{вир}}{\varphi - \gamma}(\varphi_x - \gamma) + \tau_{вир}. \qquad (3)$$

Для зони відставання (II) також характерне незначне ущільнення суміші, але цим незначним приростом початкового граничного опору зсуву можна знехтувати. Для зони відставання (II) модель середовища набуває такого вигляду:

$$\tau_s = \mathrm{tg}\varphi_{тер} \cdot p_x + \tau_{вир}.$$

Таким чином, процес контактної взаємодії робочого органа з оброблюваним середовищем можна розбити на три зони: I – зона жорстко-пластичних деформацій з проковзуванням суміші у напрямку руху ролика; II – зона жорстко-пластичних деформацій з проковзуванням суміші у напрямку, протилежному напрямку руху ролика; III – зона пружного відновлення суміші з проковзуванням суміші у напрямку, протилежному напрямку руху ролика (рис. 2).

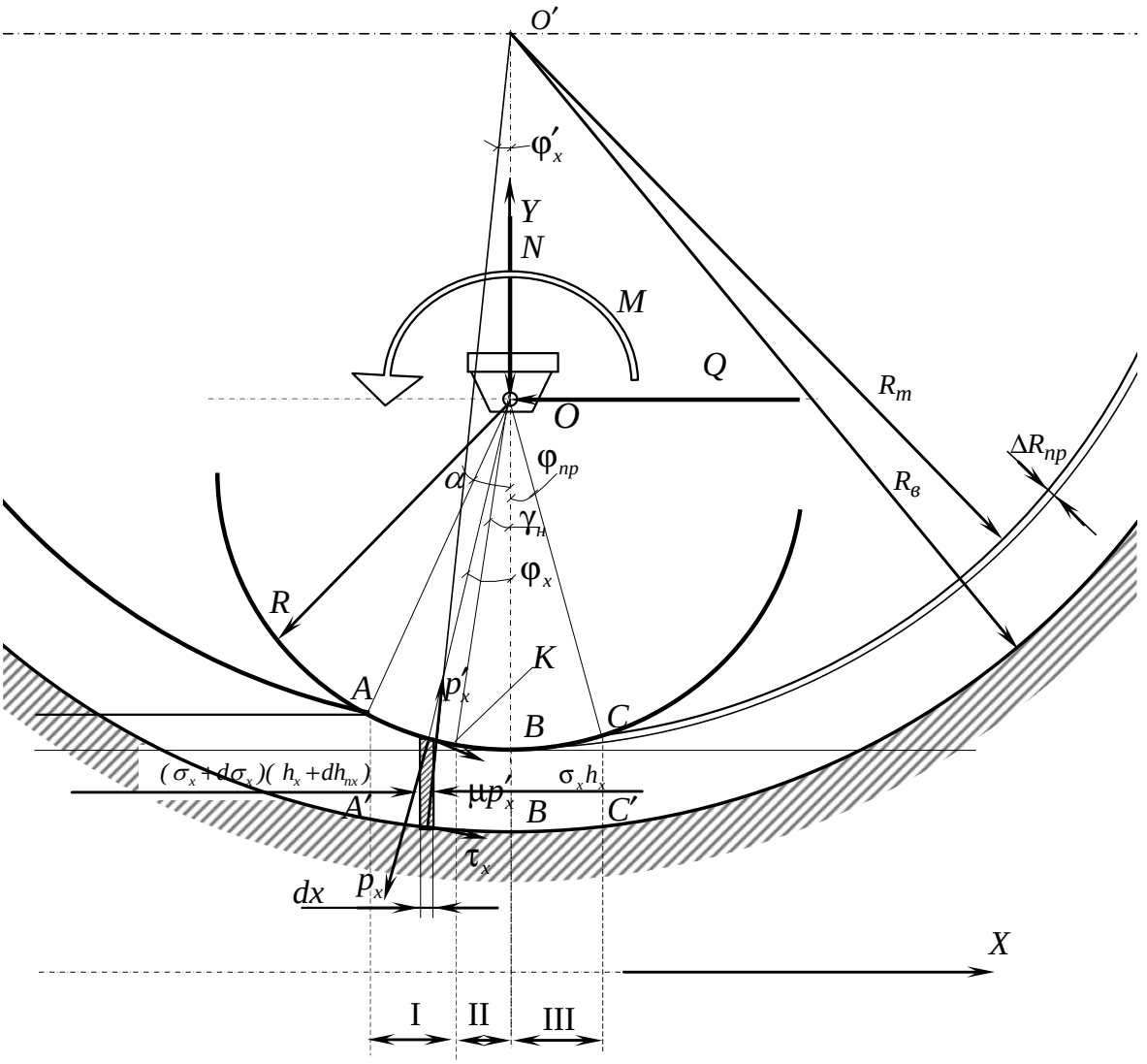


Рис. 2. Моделювання процесу роликового формування затрубного простору тунелю

Процес роликового формування суміші забезпечується наявністю сил тертя, які діють між поверхнями валків і будівельною сумішшю (див. рис. 2). В результаті взаємодії з роликом суміш розділяється на дві частини: перша потрапляє під впливом сил тертя під ролик, друга не захоплюється роликом і зсувається у напрямку його руху. Для визначення контактних тисків розглянемо умови рівноваги елементарного стовпчика суміші шириною dx, який обмежений поверхнями ролика і виробки. При цьому врахуємо, що контактні тиски можна представити у вигляді двох складових – нормальної p і дотичної τ. Оскільки дотична складова τ викликана силами тертя, її значення можна знайти за виразом

$$\tau = \mu p ,$$

де μ – коефіцієнт тертя середовища з поверхнею ролика.

Використаємо умови пластичності для двомірної деформації [7]:

$$\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2 = \tau_s^2.$$

Приймаємо, що головні осі напружень у розглянутому елементі відповідають вертикальним і горизонтальним осям:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2\tau_s. \quad (4)$$

При таких же умовах у стовпчику бетонної суміші

$$\sigma_1 - \left(p_x \frac{dx}{\cos\varphi_x}\cos\varphi_x + \tau_x \frac{dx}{\cos\varphi_x}\sin\varphi_x\right)\frac{1}{dx} = 0.$$

Знехтуємо третім членом з причини його малості порівняно з першим і другим, тоді $\sigma_1 = p_x$ і $\sigma_3 = \sigma_x$.

Відповідно до умови (4)

$$p_x - \sigma_x = 2\tau_s. \quad (5)$$

Враховуючи викладене вище, запишемо рівняння рівноваги сил, що діють на елементарний стовпчик бетонної суміші для різних зон взаємодії ролика з сумішшю:

I зона:

$$\sum X = (\sigma_x + d\sigma_x)(h_x + dh_{nx}) - \sigma_x h_x - p_x \mathrm{tg}\phi_x dx + \mu p_x dx - p'_x \mathrm{tg}\phi'_x dx + \mu_в p'_x dx = 0; \quad (6)$$

II і III зони:

$$\sum X = (\sigma_x + d\sigma_x)(h_x + dh_{nx}) - \sigma_x h_x - p_x \mathrm{tg}\phi_x dx - \mu p_x dx - p'_x \mathrm{tg}\phi'_x dx - \mu_в p'_x dx = 0, \quad (7)$$

де $\mu_в$ – коефіцієнт тертя середовища з поверхнею виробки.

Через рівність катетів, протилежних кутам ϕ_x і ϕ'_x, взаємозв'язок останніх набирає вигляду

$$\phi'_x = \arcsin\frac{R\sin\phi_x}{R_в}.$$

Під час дії ролика на середовище передача тиску *p'* нижнім шарам здійснюється з певним розсіюванням, яке можна охарактеризувати коефіцієнтом розсіювання ξ:

$$\xi = \frac{p'}{p}.$$

Підставивши вирази для p'_x і ϕ'_x в рівняння (6 і 7), отримаємо:

I зона:

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(h_x + dh_{nx}) - \sigma_x h_x - p_x \mathrm{tg}\phi_x dx + \mu p_x dx - p_x \xi\left(\mathrm{tg}\left(\arcsin\frac{R\sin\phi_x}{R_в}\right) - \mu_в\right)dx = 0;$$

II і III зони:

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(h_x + dh_{nx}) - \sigma_x h_x - p_x tg\phi_x dx - \mu p_x dx - p_x \xi \left(tg\left(\arcsin \frac{R\sin\phi_x}{R_в} \right) + \mu_в \right) dx = 0.$$

Відкинувши нескінченно малі другого порядку і врахувавши, що $tg\phi_x = dh_n / dx$, отримаємо:

I зона:

$$d\sigma_x + (\sigma_x - p_x)\frac{dh_n}{h_x} + p_x \left(\mu - \xi \left(tg\left(\arcsin \frac{R\sin\phi_x}{R_в} \right) - \mu_в \right) \right) \frac{dh_n}{h_x tg\phi_x} = 0;$$

II і III зона:

$$d\sigma_x + (\sigma_x - p_x)\frac{dh_n}{h_x} + p_x \left(-\mu - \xi \left(tg\left(\arcsin \frac{R\sin\phi_x}{R_в} \right) + \mu_в \right) \right) \frac{dh_n}{h_x tg\phi_x} = 0.$$

Використавши умови пластичності для двомірної деформації і вирази для граничного опору зсуву τ_s, отримаємо основні диференційні рівняння для визначення контактного нормального тиску:

$$d\left(p_x - 2\left(\mathrm{tg}\varphi_{тер} \cdot p_x + \frac{\tau_{нас} - \tau_{вир}}{\varphi - \gamma}(\varphi_x - \gamma) + \tau_{вир} \right) \right) =$$

$$= \left(2\left(\mathrm{tg}\varphi_{тер} \cdot p_x + \frac{\tau_{нас} - \tau_{вир}}{\varphi}\varphi_x + \tau_{вир} \right) - p_x \left(\mu - \xi \left(tg\left(\arcsin \frac{R\sin\phi_x}{R_в} \right) - \mu_в \right) \right) \right) \frac{dh_n}{h_x} = 0; \quad (8)$$

$$d\left(p_x - 2\left(\mathrm{tg}\varphi_{тер} \cdot p_x + \tau_{вир} \right) \right) =$$

$$= \left(2\left(\mathrm{tg}\varphi_{тер} \cdot p_x + \frac{\tau_{нас} - \tau_{вир}}{\varphi}\varphi_x + \tau_{вир} \right) - p_x \left(-\mu - \xi \left(tg\left(\arcsin \frac{R\sin\phi_x}{R_в} \right) + \mu_в \right) \right) \right) \frac{dh_n}{h_x} = 0. \quad (9)$$

Для знаходження рівняння рівноваги стовпчика для зони *III* підставимо в рівняння (7) співвідношення для $\beta = \frac{p_x}{\sigma_x}$:

$$\frac{dp_x}{d\varphi_x} = \frac{\left((p_x(1-\beta))\sin\varphi_x - 2\beta p_x \left(-\mu - \xi \left(tg\left(\arcsin \frac{R\sin\phi_x}{R_в} \right) + \mu_в \right) \right) \cos\varphi_x \right) \left(R - \frac{R^2 \cos\varphi_x}{\sqrt{R_в - (R\sin\varphi_x)^2}} \right)}{\left(R(1-\cos\varphi_x) - (R_m + \Delta R_{пр}) + R_в \cos\left(\arcsin \frac{R\sin\phi_x}{R_в} \right) \right)}. \quad (10)$$

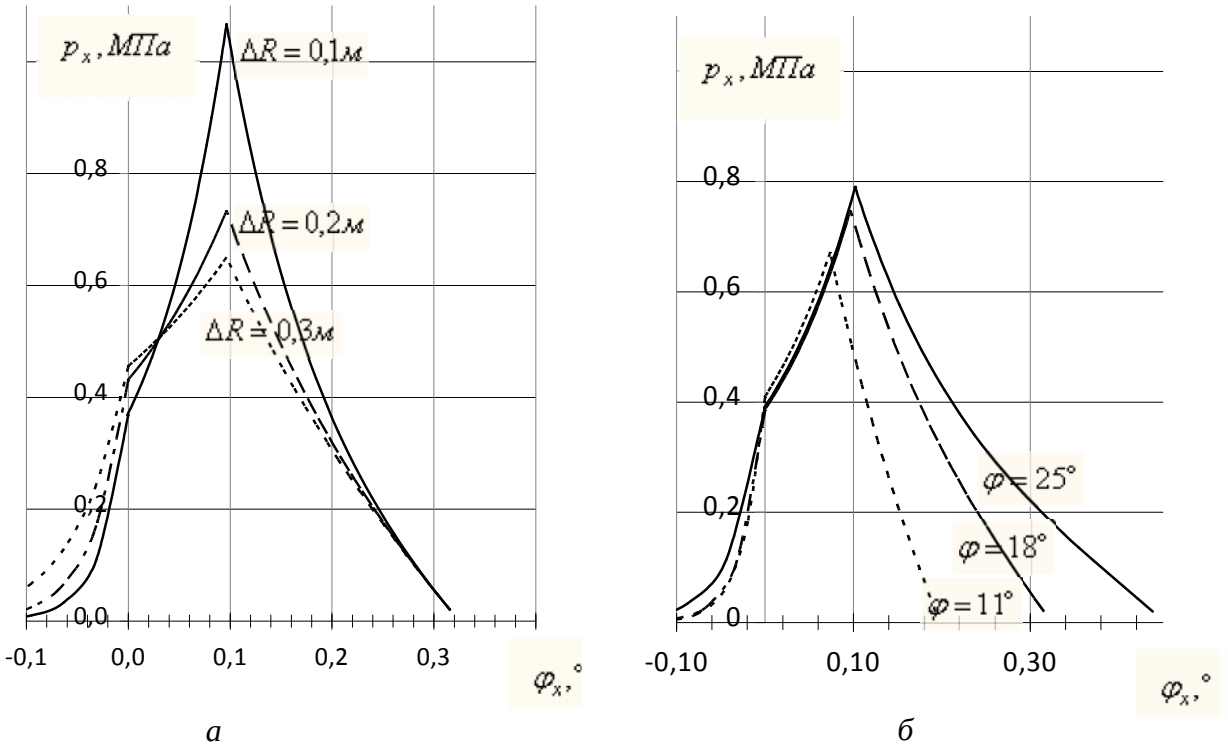
Рівняння (8, 9 і 10) можна розв’язати числовим методом Ейлера. Початковою умовою для розв’язання рівняння (8) є тиск p_A в початковій точці дуги захоплення A $\varphi_x = \varphi$, який з умови захоплення суміші

дорівнює $p_A = 2\tau_{\text{нас}} / 1 - \frac{1}{\beta}$ (див. рис. 2). Ці початкові умови можна прийняти за малих значень бокових тисків $p_A = 2\tau_{\text{нас}}$.

Для розв'язання рівняння (9) початкове значення p_x в точці дуги захоплення K $\varphi_x = \gamma$ приймемо таким, що дорівнює тиску на кінці дуги AK при розв'язанні рівняння (8). Для розв'язання рівняння (10) початкове значення p_x в точці дуги захоплення B $\varphi_x = 0$ приймемо таким, що дорівнює тиску на кінці дуги KB при розв'язанні рівняння (9).

З попереднього аналізу отриманих диференціальних рівнянь закону розподілу нормальних контактних тисків по дузі захоплення суміші випливає, що ці напруження залежать від великої кількості чинників, які характеризують властивості суміші ($\tau_{\text{нас}}$, $\tau_{\text{вир}}$, ξ, μ, β, $\varphi_{\text{тер}}$) і геометричні параметри контактної взаємодії середовища з ущільнюючими органами (R, $R_{\text{т}}$, $R_{\text{в}}$, $\Delta R = R_{\text{в}} - R_{\text{т}}$, φ).

Для наочного уявлення характеру розподілу нормального контактного тиску p_x від кута захоплення φ і товщини оброблюваного середовища ΔR на рис. 3 наведено епюри розподілу тиску по дузі взаємодії.



а *б*

Рис. 3. Теоретична епюра розподілу контактного тиску по дузі захоплення в залежності від кута захоплення (*а*) і товщини оброблюваного середовища (*б*)

Зі збільшенням кута взаємодії φ рис. 3, *а* із зменшенням висоти оброблюваного середовища $R_{\text{в}} - R_{\text{т}}$ рис. 3, *б* нормальні контактні тиски зростатимуть за рахунок збільшення деформації шару, викликаної збільшенням площі контакту.

Попередні експериментальні дослідження роликового формування показують більш плавний характер зміни контактних тисків у зоні максимальних значень. Причиною повільної зміни контактних тисків у нейтральній зоні є присутність ділянки загальмованої пластичної деформації або відсутності деформації, пов'язана з утворенням ядра ущільненого матеріалу, який прилипає до робочого органа і обертається відносно миттєвого центру *B* (див. рис. 2)

Висновки. Встановлення розподілу контактних тисків при взаємної роликових робочих органів з оброблюваним середовищем при формуванні затрубного простору тунелю дозволяє визначити залежність енергосилових параметрів машини від властивостей суміші і геометричних параметрів процесу ущільнення, що дозволить створити методику розрахунку формуючих органів тунелепрохідницьких щитів.

1. *Петренко В. И.* Современные технологии строительства метрополитенов в Украине / В. И. Петренко, В. Д. Петренко, А. Л. Тютькин. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2005. – 252 с.

2. *Лысиков Б. А.* Использование подземного пространства / Б. А. Лысиков, А. А. Каплюхин. – Донецк: Норд-Компьютер, 2005. – 390 с.

3. *Контактна* взаємодія робочих органів безвібраційних бетоноформуючих агрегатів при виробництві пустотних панелей: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.05.02 / С. В. Зайченко; Київський Національний університет будівництва і архітектури. – К., 2001. – 19 с.

4. *Гарнець В. М.* Прогресивні бетоноформуючі агрегати і комплекси / В. М. Гарнець. – К.: Будівельник, 1991. – 144 с.

5. *Кузин В. Н.* Технология роликового формования плоских изделий из мелкозернистых бетонов: Автореф. дис. канд. наук. – М., 1981. – 20 с.

6. *Hambleton J. P.* Modeling wheel-induced rutting in soils: Indentation / J. P. Hambleton // Journal of Terramechanics. – 2008. – 45(6). – С. 201–211.

7. *Ивлев Д. Д.* Механика пластических сред / Д. Д. Ивлев. – М.: Физматгиз, 2002, Т. 2. – 448 с.

Надійшла до редакції 11.09.2012 р.
Рекомендовано до друку докт. техн. наук В. Д. Петренком