

*С.В. Зайченко, канд. техн. наук, С.П. Шевчук, д-р техн. наук,,
(Україна, Київ, Національний технічний університет "КПІ")*

В.М. Гарнець, канд. техн. наук

(Україна, Київ, Київський національний університет будівництва і архітектури)

ДИСКРЕТНО-ПЛАСТИЧНА МОДЕЛЬ СЕРЕДОВИЩА ПРОЦЕСУ РОЛИКОВОГО ФОРМУВАННЯ ЗАТРУБНОГО ПРОСТОРУ ТУНЕЛЮ

Вступ.

Незважаючи на механізацію практично всіх процесів будівництва тунелів щитовим способом деякі операції, зокрема такі, як первинне і контрольне нагнітання цементно-піщаного розчину в затрубний простір мають низьку продуктивність процесу і високу трудомісткість, внаслідок відсутності засобів ущільнення суміші. Можливим рішенням проблеми ущільнення суміші є застосування безвібраційних методів ущільнення при створенні затрубно́ї оболонки тунелю.

Ефективність застосування при спорудженні тунелів безвібраційних методів підтверджують існуючі машини, в основу яких закладений принцип торкретування піщаної суміші [1, 2]. Отримана поверхня має відмінні якісно-функціональні параметри, але має недосконалу геометрію поверхні, що не дозволяє використовувати її як основу для спорудження тубінгового кільцевого кріплення. Даного недоліку позбавлений метод роликвого формування, який дозволяє отримувати ідеально плоскі або циліндричні поверхні. Поєднання двох безвібраційних методів ущільнення (рис. 1) дозволить використати їх в умовах формування затрубно́го простору тунелю з перевагами обох методів формування. Запропонована особливо доцільна технологія для спорудження тунелів під будівлями і спорудами, залізничними і трамвайними коліями і під діючими підземними комунікаціями, де вимагається забезпечити повне збереження будівель, споруд і підземних комунікацій і не допускати їх осідань.

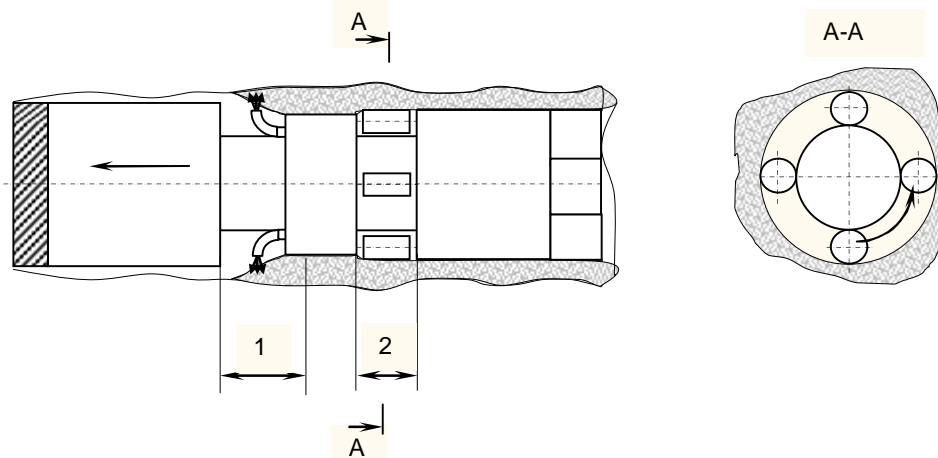


Рис. 1. Схема будівництва тунелю з роликвим формуванням трубно́го простору

В створенні машин для формування будівельних сумішей вирішальним етапом проектування є визначення головних енергосилових параметрів процесу ущільнення. Сили реакції оброблюваного середовища залежать від характеру і інтенсивності розподілу тисків в зоні контакту робочих органів з середовищем.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій.

Середовище під час дії роликвих робочих органів проявляє свої пластичні властивості. Це підтверджують експериментальні дослідження роликвого формування [3] і дослідження, пов'язані з вирішенням контактних задач кочення колеса при формуванні будівельних сумішей [4, 5].

В роботах [4, 5] властивості середовища представлені емпіричними величинами, а простір середовища представлено напівплощиною, підсиленою жорсткою плоскою основою, що ускладнює використання отриманих результатів для опису процесу формування затрубно́го простору роликвим методом при будівництві тунелю.

Мета статті. Шляхом вивчення напружено-деформованого стану середовища, що оброблюється в процесі роликвого формування затрубно́го простору тунелю, знайти тиски, які виникають у середовищі, що дозволить знайти контактні тиски взаємодії роликвих робочих органів з оброблюваним середовищем.

Постановка завдання

Для встановлення розподілу контактних тисків взаємодії роликів робочих органів з оброблюваним середовищем необхідно створити модель середовища, яка б розкривала механізм дії сил в будівельній суміші з врахуванням розмірів і трибологічних властивостей компонентів.

Виклад основного матеріалу дослідження

Головні технологічні параметри бетонної суміші залежать в першу чергу від крупності, шорсткості, просторової упаковки і величини поверхні заповнювача. Зерна заповнювача при правильно підбраному складі суміші покриті шаром цементного гелю, який розклинює частки між собою.

З вище сказаного слідує, що будівельні суміші не можуть розглядатися тільки як моноліт, деформації якого відбуваються шляхом руху частин по окремим площинам ковзання. Головною ознакою будь-якого дисперсного середовища є дискретність його часток. Взаємне розташування окремих часток заповнювача будівельної суміші залежить від щільності упаковки, яку можливо охарактеризувати кутом взаємного розташування часток χ (рис. 2, а), шляхом ідеалізації часток у вигляді циліндрів діаметром D (при плоскій постановці задачі) (рис. 2, б).

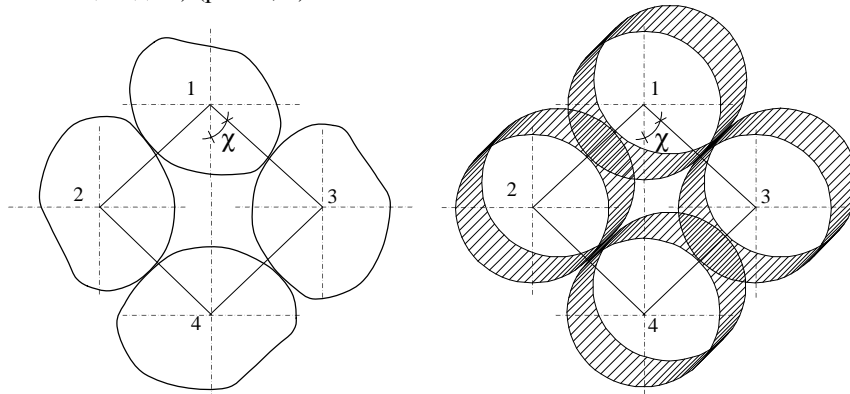


Рис. 2. Схеми компоновки заповнювача

Розглянемо розподіл сил в елементарному об'ємі суміші представленому чотирма частками при складному навантаженні. Для отримання можливості опису представленої моделі приймемо наступні припущення відносно форми, розмірів і розташування часток, характеру їх руху, виду тертя між ними:

1. Будівельна суміш закладається з однакових абсолютно твердих циліндрів, які укладені правильними шарами;
2. Сили внутрішнього тертя між частками і сили тертя шарів по робочим органам пропорційні нормальним зусиллям.

При розгляді механізму передачі зусиль в будівельній суміші розглянемо елементарній об'єм суміші при дії на нього двох сил нормальної – N і дотичної – T (рис. 3). Остання виникає у наслідок тертя частки по робочому органу і прямопропорційна нормальній складовій:

$$T = \mu N ,$$

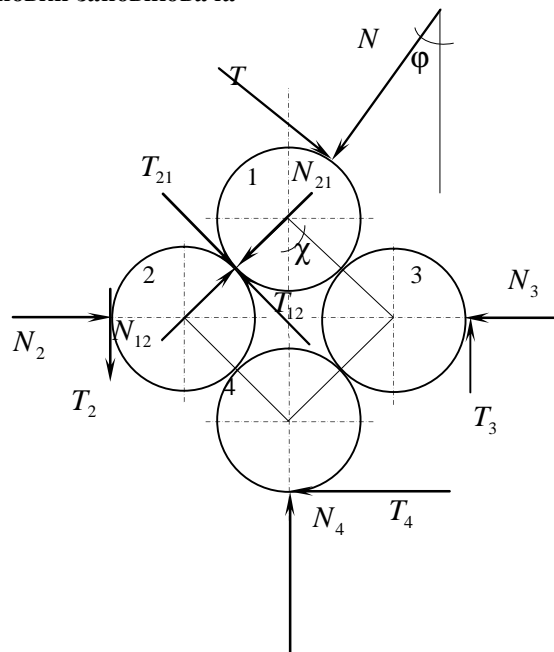


Рис. 3. Механізм дії сил в будівельних сумішах

де μ – коефіцієнт тертя суміші по поверхні робочих органів.

Реакцію середовища на елементарний об'єм суміші можливо також представити парами сил N_i і T_i (рис. 3), які прикладені до i – частки суміші i , які також пов'язані між собою законом Кулона за допомогою коефіцієнта взаємного тертя часток суміші μ' . Дію однієї частки i на частку j за умов нормального контакту представляємо силою N_{ji} , яка прикладена до точки контакту і паралельна нормалі поверхнею, і силою T_{ji} яка прикладена до точки контакту і паралельна дотичним поверхням:

$$\dot{N}_{ji} = -\dot{N}_{ij} , \dot{T}_{ji} = -\dot{T}_{ij}$$

При роликовому ущільненні будівельних сумішей відбувається перекомпоновка часток в більшій частині за рахунок вдавлювання верхніх шарів часток в нижні шари суміші. Такий рух часток верхніх шарів суміші визначає рух часток нижніх шарів суміші і напрям дотичних сил T_{ji} (рис. 3).

Для визначення розподілу сил N_i і T_i , N_{ji} і T_{ji} від нормальної N і дотичної T сил запишемо рівняння рівноваги кожної частки системи окремо:

$$\begin{cases} 1 \left\{ \begin{aligned} \sum X = 0; & N\mu \cos(\varphi_x) + N_{12}(\sin(\chi) - \mu' \cos(\chi)) + N_{13}(-\sin(\chi) + \mu' N_{13} \cos(\chi)) = 0; \\ \sum Y = 0; & -N_R \cos(\varphi_x) + N_{12}(\cos(\chi) + \mu' \sin(\chi)) + N_{13}(\cos(\chi) + \mu' \sin(\chi)) = 0; \end{aligned} \right. \\ 2 \left\{ \begin{aligned} \sum X = 0; & N_2 - N_{21}(-\sin(\chi) + \mu' \cos(\chi)) + N_{24}(-\sin(\chi) + \mu' N_{24} \cos(\chi)) = 0; \\ \sum Y = 0; & -\mu' N_2 - N_{21}(\cos(\chi) + \mu' N_{21} \sin(\chi)) + N_{24}(\cos(\chi) + \mu' \sin(\chi)) = 0; \end{aligned} \right. \\ 3 \left\{ \begin{aligned} \sum X = 0; & -N_3 + N_{31}(\sin(\chi) - \mu' \cos(\chi)) + N_{34}(\sin(\chi) - \mu' \cos(\chi)) = 0; \\ \sum Y = 0; & \mu' N_3 - N_{31}(\cos(\chi) + \mu' \sin(\chi)) + N_{34}(\cos(\chi) + \mu' \sin(\chi)) = 0; \end{aligned} \right. \\ 4 \left\{ \begin{aligned} \sum Y = 0; & -N_{42}(\cos(\chi) + \mu' \sin(\chi)) - N_{43}(\cos(\chi) + \mu' N_{43} \sin(\chi)) + N_4 = 0. \end{aligned} \right. \end{cases}$$

Знайдемо необхідні корені системи для подальшого дослідження розподілу сил в будівельних сумішах:

$$N_2 = N \frac{\sin(\chi + \varphi) - f \cos(\chi + \varphi) - \mu \cos(\chi + \varphi) - \mu f \sin(\chi + \varphi)}{2f \sin(\chi) + \cos(\chi)(1 - f^2)}; \quad (1)$$

$$N_3 = N \frac{\sin(\chi - \varphi) - f \cos(\chi - \varphi) + \mu \cos(\chi - \varphi) + \mu f \sin(\chi - \varphi)}{\cos(\chi)(f^2 + 1)}; \quad (2)$$

Для спрощення визначення N_4 скористаємось рішенням для випадку коли $\varphi = 0$:

$$N_4 = N \frac{\cos(\chi)(f^2 + 1)}{2 \sin(\chi)f - \cos(\chi)f^2 + \cos(\chi)};$$

В реальному середовищі частки розташовані хаотично, внаслідок чого реакції стінок розподіляються безперервно по контактуючим поверхням. Виходячи з цього припущення, тиски в елементарному об'ємі розподіляються пропорційно знайденим зусиллям і обернено контактним площинам.

Розглянемо взаємодію середовища з контактуючими поверхнями в умовах формування затрубного простору тунелю (рис. 4). Для визначення контактних тисків розглянемо умови рівноваги елементарного стовпчика суміші шириною dx , який обмежений поверхнями ролика і вироблення.

Внаслідок нерівномірності розподілу контактних тисків в зоні дії ущільнюючих органів, суміш проковзує з зони дії максимальних тисків в зони з меншими тисками. Очевидно, що для випадку роликового формування, суміш буде пересуватись в напрямку початку і кінця контакту. Зміну напрямку проковзування суміші по поверхні контакту характеризує нейтральний кут γ , яки розбиває зону навантаження на дві зони: I – випередження і II – відставання (рис. 4).

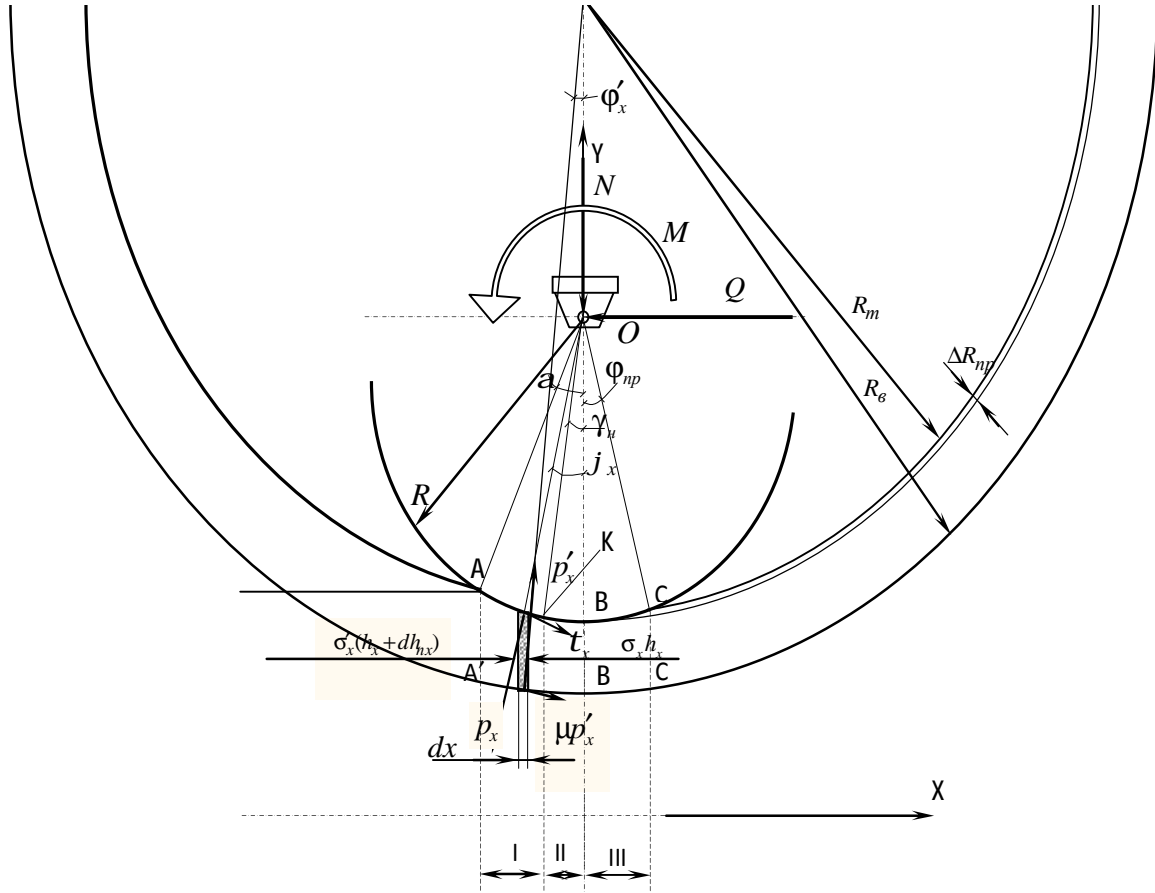


Рис. 4. Схема взаємодії суміші з роликівим робочим органом

Приймаємо, що головні осі напружень в розглянутому елементі відповідають вертикальним і горизонтальним осям. Використовуючи рішення системи рівнянь (1, 2), для зони I:

$$\begin{aligned}\sigma'_x &= p_x k'_I = p_x \frac{\sin(\chi + \varphi) - f \cos(\chi + \varphi) - \mu \cos(\chi + \varphi) - \mu f \sin(\chi + \varphi)}{2f \sin(\chi) + \cos(\chi)(1 - f^2)}; \\ \sigma_x &= p_x k_I = p_x \frac{\sin(\chi - \varphi) - f \cos(\chi - \varphi) + \mu \cos(\chi - \varphi) + \mu f \sin(\chi - \varphi)}{\cos(\chi)(f^2 + 1)};\end{aligned}\quad (3)$$

для зони II:

$$\begin{aligned}\sigma'_x &= p_x k'_{II} = p_x \frac{\sin(\chi + \varphi) - f \cos(\chi + \varphi) + \mu \cos(\chi + \varphi) + \mu f \sin(\chi + \varphi)}{2f \sin(\chi) + \cos(\chi)(1 - f^2)}; \\ \sigma_x &= p_x k_{II} = p_x \frac{\sin(\chi - \varphi) - f \cos(\chi - \varphi) - \mu \cos(\chi - \varphi) - \mu f \sin(\chi - \varphi)}{\cos(\chi)(f^2 + 1)};\end{aligned}\quad (4)$$

де $k'_I, k_I, k'_{II}, k_{II}$ – коефіцієнти пропорційності для зон I і II.

Різниця тисків, які діють на елемент:

$$\Delta\sigma_x = \sigma_x - \sigma'_x = p_x(k_i - k'_i),\quad (5)$$

де i – номер зони дії робочого органу.

Прирощення тиску $d\sigma_x$ пропорційне ширині елемента dx :

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = \frac{\Delta\sigma_x}{\Delta R},\quad (6)$$

де ΔR – відстань між сусідніми шарами:

$$\Delta R = 2D \sin(\chi)$$

Частки в реальному середовищі розташовані хаотично і практично безперервно, а лінійні розміри часток на декілька порядків менше за розміри зони дії, що дозволяє використати рівняння механіки суцільного середовища. Використаємо умови пластичності для двовірної деформації[3]:

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

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

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2\tau_s, \quad (7)$$

де τ_s – значення опору зсуву будівельної суміші.

При таких же умовах в стовпчику бетонної суміші маємо:

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

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

Відповідно до умови (7):

$$p_x - \sigma_x = 2\tau_s. \quad (8)$$

Під час дії ролика на середовище передача тиску p' нижнім шарам здійснюється з певним розсіюванням, яке пропорційне кількості шарів елементарних елементів товщиною $2d \cos(\phi)$ в стовпчику суміші h_x . Зменшення тиску можливо охарактеризувати коефіцієнтом розсіювання ξ :

$$\xi = \frac{p'_x}{p_x} = \frac{\cos(\chi)(f^2 + 1)}{2 \sin(\chi)f - \cos(\chi)f^2 + \cos(\chi)} \cdot \frac{2D \cos(\chi)}{h_x}.$$

Аналіз виразу зменшення тиску p' свідчить про лінійну залежність від висоти стовпчика h_x суміші, що дозволяє використати для опису взаємодії стовпчиків суміші середнє значення розсіювання тиску $\bar{\xi}$:

$$\bar{\xi} = \frac{1}{2} \frac{(p_x + p'_x)}{p_x} = \frac{2D(\cos(\chi))^2(f^2 + 1) + h_x \cos(\chi)(1 - f^2) + 2h_x f \sin(\chi)}{2h_x \cos(\chi)(1 - f^2) + 4h_x f \sin(\chi)}.$$

Підставимо у вираз (6) значення для $\Delta\sigma_x$ (5):

$$d\sigma_x = \bar{\xi} \frac{p_x(k - k')}{2D \sin(\chi)} dx. \quad (9)$$

Використаємо умови пластичності(8):

$$d\sigma_x = \bar{\xi} \frac{(2\tau_s + \sigma_x)(k - k')}{2D \sin(\chi)} dx.$$

Враховувавши, що $\text{tg}\phi_x = \frac{dh_n}{dx}$:

$$d\sigma_x = \bar{\xi} \frac{(2\tau_s + \sigma_x)(k - k')}{2D \sin(\chi)} \frac{dh_n}{\text{tg}\phi_x}. \quad (10)$$

Через рівність катетів, що протилежні кутам f_x і f'_x , взаємозв'язок останніх набирає вигляду:

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

Змінні ϕ_x і h_x визначають одну точку на дузі ролика, що дозволяє виразити h_x через ϕ_x :

$$h_x = R(1 - \cos \phi_x) - (R_m + \Delta R_{np}) + R_g \cos \left(\arcsin \frac{R \sin \phi_x}{R_g} \right). \quad (11)$$

Диференціюючи вираз (11), отримуємо:

$$dh_x = \left(R \sin \phi_x - \frac{R^2 \frac{\sin 2\phi_x}{2}}{\sqrt{R_g - (R \sin \phi_x)^2}} \right) d\phi_x.$$

Після підстановки значення dh_x у вираз (10) і перетворень, отримуємо головне диференціальне рівняння розподілу напружень σ_x у середовищі при дії роликового робочого органу в умовах формування затрубного простору для зони навантаження (I і II):

$$\frac{d\sigma_x}{d\phi_x} = \bar{\xi} \frac{(2\tau_s + \sigma_x)(k_i - k'_i)}{2D \sin(\chi)} \frac{\left(R \sin \phi_x - \frac{R^2 \frac{\sin 2\phi_x}{2}}{\sqrt{R_g - (R \sin \phi_x)^2}} \right)}{tg \phi_x}. \quad (12)$$

Для визначення напружень σ_x у зоні розвантаження III (рис. 4), де суміш більшою мірою проявляє свої пружні властивості, використаємо співвідношення вертикальної і горизонтальної складової умови рівноваги стовпчика бетонної суміші (4) шляхом його підстановки в (9):

$$\frac{d\sigma_x}{d\phi_x} = \bar{\xi} \frac{\sigma_x \left(1 - \frac{k'}{k} \right)}{2D \sin(\chi)} \frac{\left(R \sin \phi_x - \frac{R^2 \frac{\sin 2\phi_x}{2}}{\sqrt{R_g - (R \sin \phi_x)^2}} \right)}{tg \phi_x}. \quad (13)$$

Слід відзначити, що пружні властивості суміш проявляє на останніх стадіях ущільнення і може бути відсутня на початкових стадіях ущільнення.

Рішення диференціального рівняння розподілу тиску у середовищі можливо численным методом Ейлера. Початковою умовою для вирішення рівняння (12) є тиск – σ_{xA} в початковій точці дуги захвату A, який за умови захвату суміші дорівнює $\sigma_{xA} = 2\tau_0$. Дані початкові умови можливо прийняти за малих значень бокових тисків при початку взаємодії рихлої суміші і ролика.

Для рішення рівняння (12) для зони II початкове значення σ_x в точці дуги захвату K σ_{xK} приймемо рівним значенню тиску на кінці дуги AK при рішенні рівняння (12) для зони I. Для рішення рівняння для зони III початкове значення p_x в точці дуги захвату B σ_{xB} $\phi_x = 0$ приймемо рівним значенню тиску на кінці дуги KB при рішенні рівняння (13).

З попереднього аналізу отриманих диференціальних рівнянь закону розподілу нормальних контактних тисків по дузі захвату суміші слідує, що дані напруження залежать від великої кількості чинників, які характеризують властивості суміші (χ , τ_0 , τ_s , D , f , μ) і геометричні параметри контактної взаємодії середовища з ущільнюючими органами (R , R_m , R_g , ΔR , ϕ).

Розглянемо вплив кута взаємного розташування часток χ на розподіл тиску у середовищі шляхом рішення рівняння при різних значеннях $\chi = 45^\circ$; 50° ; 55° за умови рівності решти параметрів. Для наочності рішення представимо рішення у вигляді графіка (рис. 5).

Аналізу графіка (рис. 5) свідчить, що зі збільшенням кута взаємного розташування часток χ , яке характеризує більш ущільнену суміш, значення нормальних напружень у середовищі зростають за рахунок більш жорсткої реакції середовища на зовнішній вплив. Розподіл напружень за дугою захвату свідчить про зростання напружень до нейтральної точки, після якої відбувається зменшення тиску внаслідок зміни напрямку проковзування суміші по робочому органу. Слід відзначити, що для рихлої суміші, якій відповідає кут взаємного розташування часток $\chi = 45^\circ$, отримане рішення свідчить про відсутність зони пружного відновлення.

Збільшення кута взаємного розташування часток χ пов'язано із збільшенням щільності середовища, якому відповідають більші міцності показники середовища τ_s , що суттєво вплине на нормальні напруження у середовищі σ_x в сторону збільшення.

Висновки

Встановлення розподілу напружень в зоні дії роликів робочого органу σ_x в залежності від кута взаємного розташування часток χ дозволяє знайти контактні тиски p_x шляхом використання рівняння (4, 3) взаємозв'язку горизонтальних напружень з навантаженням в елементарному об'ємі суміші, що в свою чергу дозволяє визначити енергосилові параметри машини від властивостей суміші і геометричних параметрів процесу ущільнення та які дозволяють створити методіку розрахунку формуючих органів тунелепрохідницьких щитів.

Список літератури

1. Тимченко, Р.А. Конструктивное решение поперечного тоннеля [Текст] / Р.А. Тимченко, В.Л. Седин // Вісник Криворізького технічного університету. – 2011. – Вип. 28 – С. 230-234.
2. Баранов, А.М. Теоретичні основи робочих процесів машин набризку будівельних сумішей [Текст] : автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.05.02 [Електронний ресурс] / А.М. Баранов; Харк. держ. техн. ун-т буд-ва та архіт. – Х., 2001. – 33 с.
3. Зайченко, С. В. Експериментальні дослідження роликів формування [Текст] / С.В. Зайченко // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини: Республ. між від. наук.-техн. зб.-к. – К.: Вид-во КНУБА, 2000. – Вип. 56. – С. 82–87.
4. D. Gene Daniel "Factors influencing Concrete Workability" Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials, Bridgeport, 2006, pp. 59-72.
5. Von Siegfried Velske / Horst Mentlein / Peter Eymann Straßenbau, Straßenbautechnik., neubearb. Aufl. Werner, Neuwied Kartoniert 2009. ISBN 978-3-8041-3879-7.

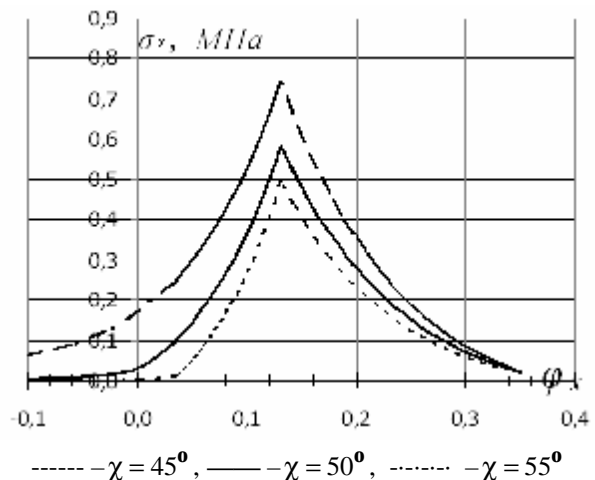


Рис. 5. Теоретична епюра розподілу напружень в зоні дії роликів робочого органу σ_x в залежності від кута взаємного розташування часток χ

Рекомендовано до друку проф. Самусею В.І.