

УДК 624.21 + 624.19(066)

С.В. ЗАЙЧЕНКО (канд. техн. наук, доц.)

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ

УЩІЛЬНЕННЯ КОНТУРУ ТУНЕЛЮ МЕТОДОМ РОЛИКОВОГО ФОРМУВАННЯ З УРАХУВАННЯМ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ҐРУНТОВОГО МАСИВУ

В статті представлена модель процесу формування геотехнічних властивостей прилеглого контуру гірського масиву підземної виробки методом роликового пресування з урахуванням зон різного типу деформацій і реологічних властивостей ґрунту. Змодельовані основні технологічні параметри процесу обробки прилеглого контуру тунелю: розподіл нормальних тисків і висоти зон різного типу деформацій залежно від основних міцнісних та деформаційних властивостей гірського масиву, геометрії та особливостей зони контакту роликового робочого органу з оброблюваним середовищем. Обґрунтовано вибір розрахункової моделі процесу формування властивостей прилеглого контуру ґрунтових масивів роликовим методом з урахуванням виникаючих процесів при деформації ґрунтів: виникнення пружної і пластичної деформації, реологічних властивостей ґрунту.

Ключові слова: будівництво тунелів, гірський масив, ґрунт, роликовий робочий орган.

Постановка проблеми. Методи проектування і будівництва тунелів потребують удосконалення технічних засобів і методів з метою забезпечення загальної стійкості і надійності конструкції.

Виділення невирішеної проблеми. Сучасна технологія зведення тунелів глибокого або мілкового закладання в ускладнених геологічних умовах передбачає щитову проходку з багат шаровим кріпленням з комбінацією монолітних і збірних елементів та попередньою струминною стабілізацією гірського масиву (jet grouting method). Застосування даного способу будівництва пов'язано з надмірними витратами в'язучих компонентів, збільшенням енергоємності і руйнуванням цілісності контуру масиву при проходці. Спостереження і дослідження поведінки прилеглих ділянок виробок свідчать про концентрацію напружень і деформацій, які приводять до руйнування контуру виробки. Саме тому обробка прилеглого контуру виробки є важливим заходом для збільшення загальної стійкості конструкції і покращення експлуатаційних властивостей шляхом підсилення несучої здатності приконтурного масиву [1].

Застосування формування геотехнічних властивостей прилеглого контуру масиву гірської виробки шляхом роликового пресування дозволяє позбутись наведених недоліків. Також слід відзначити суттєве зменшення трудомісткості і збільшення швидкості будівництва за рахунок повної механізації процесу обробки прилеглого контуру. Обробка контуру масиву роликовим методом полягає в ущільненні середовища, що оброблюється, з можливістю додавання в'язучих і компонентів, що структурують.

Аналіз останніх досліджень. Розробкою нових технологій формування властивостей ґрунтів, дослідженню процесів, які супроводжують процес ущільнення ґрунтів різними способами, займалося велике число дослідників, серед яких можливо відзначити роботи: В. П. Ананьва, Ю. А. Багдасарова, А. А. Бартоломея, В. Г. Березанцева, Дж. Биареза, В. І. Бирули, С. С. Вялова, М. Н. Гольдштейна, А. В. Захаренко, М. М. Летошнева, Я. А. Калужского, В. І. Крдюмова, М. О. Цитовича, М. Я. Хархути та ін.

Дослідження процесів ущільнення зводиться до визначення напружень і деформацій, які виникають у середовищі, що оброблюється при дії робочого органу. При розгляді процесу ущільнення вище згаданих авторів слід відзначити переважну більшість плоских розрахункових моделей з наданням ґрунтовому масиву пруж-

жних і пластичних властивостей, без врахування реологічних(в'язких) властивостей ґрунтів.

Також слід відзначити трьохмірні дослідження контактної взаємодії індеторів, що котяться по пластичному середовищу, властивості якого представлено моделями Друкера-Прагера і Кулона-Мора, які спрямовані на встановлення глибини осадки і напружень, які виникають на поверхні і нескінченному півпросторі [2]. Ряд досліджень використовують апріорний розподіл контактних тисків при визначенні осадки і напружень [3]. При моделюванні процесів ущільнення котками ґрунтів і асфальтобетонних сумішей розглядається плоска задача, а властивості суміші при визначенні контактних навантажень задані модулем деформації [4].

Виділення невіршеної раніше частини загальної проблеми. Більшість розрахункових моделей при моделюванні процесу взаємодії середовища з роликочними робочими органами не враховують можливе розділення зони силового впливу за характером деформацій і реологічних властивостей. Данні обставини обмежують застосування результатів попередніх досліджень присвячених взаємодії роликочних робочих органів з гірським масивом без врахування наведеннях особливостей.

Формулювання мети роботи. Для встановлення головних технологічних параметрів процесу формування геотехнічних властивостей прилеглої контуру підземної споруди (напруження, деформації, глибина обробленого шару) слід створити моделі процесу контактної взаємодії роликочного робочого органа з середовищем, що обробляється, з врахуванням зон різного типу деформацій і реологічних властивостей ґрунту.

Виклад основного матеріалу. При визначенні головних технологічних параметрів процесу обробки контуру виробки слід встановити закономірності розподілу напружень і характеру та значень виникаючих деформацій гірського масиву. При дії на ґрунтовий масив роликочного робочого органа, середовище, що обробляється, в залежності від значень виникаючих деформацій поверхні проявляє свої пружні і пластичні властивості. Початок взаємодії робочого органу (зона I, дуга AB, ϕ_I) (рис. 1) супроводжується пружними і пластичними деформаціями масиву, які відповідають фазі ущільнення і зсувів(фаза ущільнення і локальних зсувів)(зона I).

Подальший вплив робочого органу призводить до утворення фази розвинутої пластичної течії(фаза розвитку значних зсувів) між сформованим ядром ущільнення (зона II) і зоною ущільнення, яка утворюється ядром (зона III). Утворене ядро ущільненого матеріалу обертається з робочим органом, контактуючи по дузі AD відносно миттєвого центру обертання C . Силовий вплив зі сторони робочого органу на утворене ядро призводить до його деформації, що створює відносний рух часток ґрунту відносно прилеглих поверхонь. Так частки ґрунту, які контактують з робочим органом (дуга AD) зсуваються з зони тисків в сторони вільні від силового впливу, утворюючи зони випередження (дуга $A\dot{A}$) і відставання (дуга $\dot{A}D$), які характеризуються нейтральним кутом γ . Кінцю контакту робочого органу з середовищем відповідає кут пружного відновлення - $\phi_{i\delta}$.

Для вирішення контактної задачі взаємодії робочого органу з масивом вставимо геометричні параметри ядра ущільнення, виходячи з положення кута нахилу поверхні ядра α до площини поверхні штампа:

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi_{\tau}}{2},$$

де ϕ_{τ} - кут внутрішнього тертя ґрунту.

Внаслідок криволінійності штампа, рівняння висоти ядра $h_x(\varphi_x)$ для зони випередження і зони відставання набувають наступного вигляду:

$$h_x(\varphi_x) = R \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi\tau}{2}\right)(\varphi - \varphi_x), \quad \varphi_x \in (\varphi; \gamma); \quad h_x(\varphi_x) = R \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi\tau}{2}\right)(\varphi - 2\gamma + \varphi_x), \\ \varphi_x \in (\gamma; \varphi; \delta),$$

де R - радіус робочого органу; φ - кут дуги зони навантаження AEC .

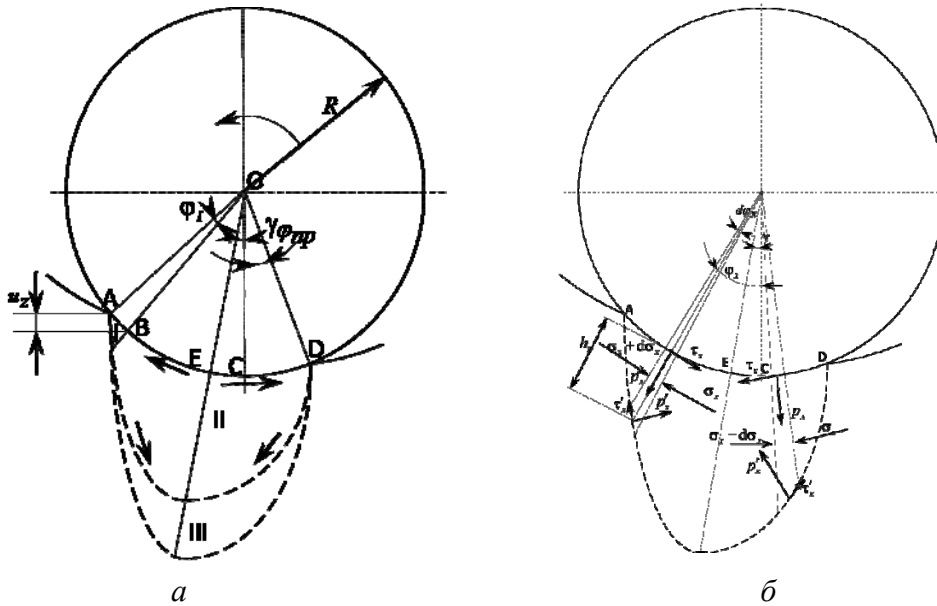


Рис.1 Схеми розподілу зон деформацій (а) і моделювання процесу (б) обробки гірського масиву роликівим методом:

I – зона ущільнення робочого органу; II - зона ядра ущільнення; III – зона ущільнення ядра ущільнення; R - радіус робочого органу; AB - дуга контакту робочого органу з зоною I; BD - дуга контакту робочого органу з зоною II; AE - дуга контакту з зоною випередження; ED - дуга контакту з зоною відставання; C - нижня точка контакту; u_z - осадка площадки зони I; φ_I - кут дуги AB ; γ - нейтральний кут; $\varphi; \delta$ - кут пружного відновлення; $h_x(\varphi_x)$ - висота ядра; σ_x - нормальне напруження; p_x і p'_x - нормальні складові контактних тисків дії робочого органу і середовища; τ_x і τ'_x - дотичні складові контактних тисків дії робочого органу і середовища; $d\sigma_x$ - прирощення нормального напруження; φ_x - кут, який визначає положення сегменту ядра; $d\varphi_x$ - ширина сегменту ядра.

Розглянемо рівновагу сегменту ядра шириною $d\varphi$, на який зі сторони робочого органу і ґрунтового масиву діють нормальні p_x і p'_x і дотичні тиски τ_x і τ'_x , які пов'язані між собою законом Кулону, а зі сторони сусідніх шарів - нормальні напруження σ_x і $\sigma_x + d\sigma_x$. Спроектувавши їх на вісь перпендикулярну радіусу робочого органу в точці з координатою φ_x (рис. 1, б), отримаємо:

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(h_x + dh_x) - \sigma_x h_x \pm \tau_x R d\varphi \pm p'_x \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi\tau}{2}\right)(R + h_x) d\varphi_x \mp \tau'_x (R + h_x) d\varphi_x = 0 \quad (1)$$

Взаємозв'язок колінеарних і ортогональних за напрямом до радіуса напружень можливо знайти використовуючи коефіцієнт бокового тиску:

$$\xi = \frac{\sigma_x}{p_x}. \quad (2)$$

Внаслідок розсіювання напружень відбувається зменшення значення напружень від дії робочого органу від p_x при контакті з робочим органом до p'_x при контакті ущільненого ядра з гірським масивом. Відношення напружень на границях ядра можливо визначити використовуючи залежності, які пов'язують розподіл головних напружень від дії розподіленого навантаження на пружній півпростір:

$$\beta = \frac{p'_x}{p_x} = \frac{\pi}{\left(\frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{L'}{2h\tilde{n}\delta}\right) - \arctan\left(\frac{2h\tilde{n}\delta}{L'}\right)\right)}, \quad (3)$$

де L' - ширина зони силового впливу; $h\tilde{n}\delta$ - середня висота ядра.

Після підстановки виразів 2, 3 в рівняння (1) і перетворень, отримуємо основне диференціальне рівняння розподілу нормального тиску по дузі контакту робочого органу з гірським масивом:

$$\frac{dp_x}{d\varphi_x} = p_x \frac{-\xi h'_x - \mu R + (\mp \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_\tau}{2}\right) \pm \mu') \beta (R + h_x)}{\xi h_x} \quad (2)$$

де $h'_x = \frac{dh_x(\varphi_x)}{d\varphi_x}$; μ і μ' - коефіцієнти тертя ґрунту по поверхні робочого органу і тертя ґрунту по ґрунту.

Диференціальне рівняння (4) можливо рішення чисельним методом Ейлера, встановивши початкові умови. Початковими умовами для рішення рівняння є кут φ_I і напруження $p_x(\varphi_I)$, при якому ґрунт під дією навантажень переходить в фазу пластичної течії між сформованим ядром ущільнення і оточуючим ядром масивом.

Для визначення початкових умов встановимо залежності між осадкою ґрунту u_z в точці розділу зон I, II і геометричними параметрами зони контакту (рис. 1):

$$u_z = R(\cos(\varphi - \varphi_I) - \cos(\varphi)). \quad (5)$$

Скористаємось методикою розрахунку осадки ґрунту, яка основана на закономірностях лінійно-деформованого простору, що вперше запропонована Ф. Шлейхером і В.Г. Короткіним. Осадка навантаженої площадки від дії розподіленого навантаження p визначається:

$$u_z = \frac{\omega'(1 - \mu_0^2)pb}{E_0}, \quad (6)$$

де ω' - інтегральний табличний коефіцієнт, який залежить від форми контакту; E_0 - модуль загальної деформації; μ_0 - коефіцієнт відносної загальної поперечної деформації; b - площа контакту.

Площа контакту b :

$$b = R\varphi_I. \quad (7)$$

Після підстановки (7) в (6) і вирішення системи рівнянь (6) і (5) отримаємо значення кута φ_I :

$$\varphi_I = 2\left(\tan(\varphi) - \frac{\omega' p_x(\varphi_I)}{\cos(\varphi)}\right).$$

Рішення чисельним методом Ейлера диференціального рівняння розподілу нормального тиску по дузі контакту ядра з робочим органом представлено на рис. 2 у вигляді поверхні і ізоліній розподілу тисків по зоні контакту для наступних умов: $\varphi_{\tau 0} = 22^\circ$, $\varphi_{\pi i} = 25^\circ$, $\mu = 0,3$, $R = 0,3$, $c = 0,24 \text{ МПа}$, $E_0 = 17 \text{ МПа}$,

Встановлення тисків яки виникають при утворенні ядра ущільнення дозволяють перейти до розгляду зони розвиненої пластичної течії рис. 3. Розглянемо умови рівноваги елементу ґрунту в двох випадках, коли він знаходиться в зоні випередження і коли він знаходиться в зоні відставання спроектував діючи сили на вісь, яка перпендикулярна висоті елементу. Після перетворень умов рівноваги і використання умов пластичності Треска-Сен-Венана можливо отримати диференціальні рівняння рішення яких відносно h_{222} дозволяє встановити висоту зони розвиненої пластичної деформації:

Для зони випередження (дуга $A'E'$):

$$\frac{dh_{222}}{d\varphi_x} = \frac{\text{tg}(\beta)}{\frac{1}{(R+h_x+h_{222})} + \frac{(1+\mu'\text{tg}(\beta)) - \frac{2\tau_s}{p'_x}}{(R+h_x)}}. \quad (8)$$

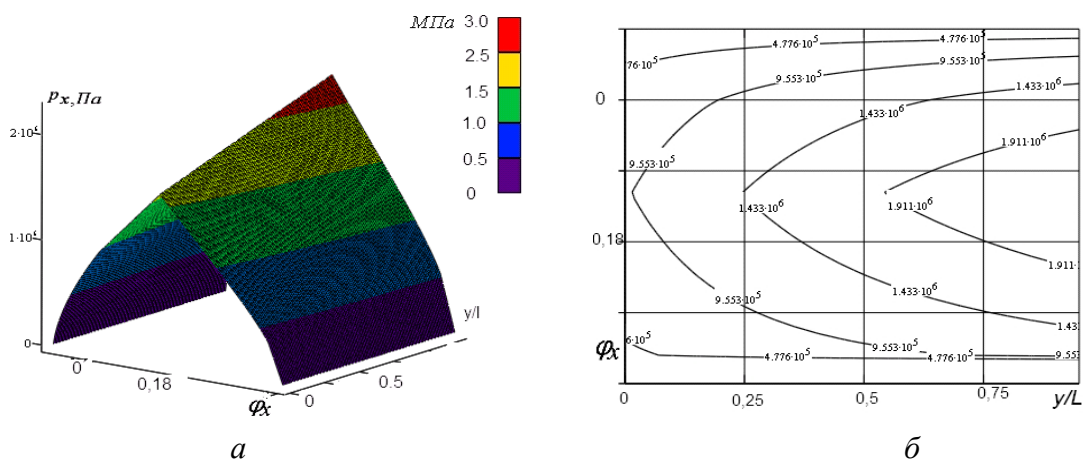


Рис.2. Розподіл нормальних тисків по поверхні контакту: а – поверхня розподілу тисків; б – ізолінії розподілу тисків, Па

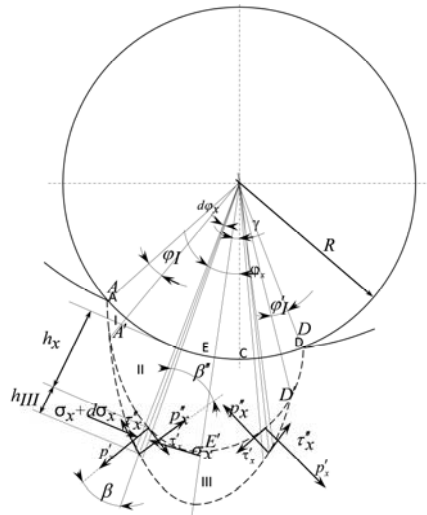


Рис. 3 Розрахункова схема моделювання процесу ущільнення в зоні розвиненої пластичної деформації

Для зони відставання (дуга $E'D'$):

$$\frac{dh_{222}}{d\varphi_x} = \frac{\operatorname{tg}(\beta)}{\frac{1}{(R+h_x+h_{222})} - \frac{(1+\mu'\operatorname{tg}(\beta)) - \frac{2\tau_s}{p'_x}}{(R+h_x)}}, \quad (9)$$

де μ' - коефіцієнт тертя; τ_s - граничний опір зсуву.

Середня по висоті кутова деформація елемента, що розглядається швидкості зони III врахував, що $\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{(R+h_x)} \frac{1}{d\varphi_x}$ і $\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{h_{III}}$:

$$\text{ділянка } A'E' : \dot{\gamma} = \bar{V}'_{E'} \left(\frac{\cos\beta}{(R+h_x)(\varphi - \gamma - \varphi_I)} + \frac{\cos\alpha}{h_{222}} \right), \varphi_x \in (\varphi - \varphi_I; \gamma);$$

$$\text{ділянка } E'D' : \dot{\gamma} = \bar{V}'_{E'} \left(\frac{\cos\beta}{(R+h_x)(\gamma + \varphi_{i\delta} - \varphi_I)} + \frac{\cos\alpha}{h_{222}} \right), \varphi_x \in (\gamma; \varphi_{i\delta} - \varphi'_2).$$

Скориставшись розробленим алгоритмом розрахунку головних параметрів формування ґрунтового масиву роликівим методом скоректував значення міцності матеріалу з врахуванням в'язкої складової визначено розподіл висоти зони розвиненої пластичної деформації. Визначення в'язкої складової міцності матеріалу можливо з використанням результатів дослідження реологічних параметрів ґрунтових сумішей. На рисунку 4 представлено розподіл висоти зони розвиненої пластичної деформації III з врахуванням реологічних властивостей суміші при дії роликівого робочого органу радіусом $R = 0.3i$ зі швидкістю руху $V_p = 5i / \text{h}$.

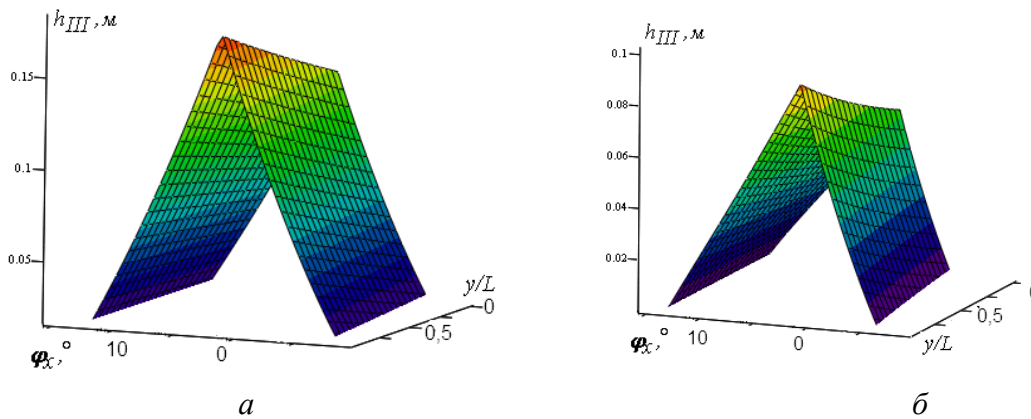


Рис. 4 Розподіл висоти зон розвинутої пластичної деформації:
 а – суміш №1 вологість $W_c = 18\%$; б – суміш №3 вологість $W_c = 14\%$

Висновки

Порівняння розподілів висоти зони ²²² отриманих при різній поведінці поведінки ґрунтів (пластичної і в'язко-пластичної) свідчить про необхідність врахування в'язких властивостей середовища при моделюванні процесу роликowego формування геотехнічних властивостей прилеглого контуру підземної споруди. Особливо велика різниця отриманих результатів виникає для ґрунтів з великим вмістом глини (суміші №3, вміст глини 30%). Максимальна відносна різниця значень отриманих розподілів висоти h_{III} при різних моделях складає 44.4% при абсолютних значеннях максимальних висот 0,063 м і 0,091 м.

Зі зменшенням вмісту глиняних часток в ґрунті в'язкі властивості проявляються в меншій мірі, що проявляється в свою чергу в практично рівному розподілі висот ущільненого матеріалу. Про що свідчить порівняння розподілів висот для суміші з вмістом глини 10% (суміш №1). Максимальна відносна різниця значень отриманих розподілів висоти h^{222} при різних моделях складає 5.3% при абсолютних значеннях максимальних висот 0.170 м і 0.179 м. Цілком очевидно, що збільшення швидкості деформації (до 5 м/с) призводить до збільшення глибини ущільненого приконтурного шару ґрунту, що в свою чергу позитивно відзначиться на несучій здатності тунелю.

Запропонований підхід аналізу силового впливу роликowego робочого органу при обробці контуру підземної виробки дозволяє прогнозувати необхідні значення напружень, які виникають в ядрі ущільнення. Отриманні залежності форми ядра ущільнення і виникаючих тисків на периферії також дозволяють дослідити зону ущільнення III з метою встановлення її висоти і виникаючих в ній напружень.

Використовуючи наведені спрощені моделі поведінки ґрунту при дії роликowego робочого органу можливо вважати, що після проведення процесу формування геотехнічних властивостей прилеглого контуру, у випадку будівництва тунелю кругового обрису, ґрунтовий гірський масив буде розділено зони з границями і у вигляді серії концентричних кіл, кількість шарів яких визначається необхідною товщиною стабілізованого шару ґрунту.

Список використаної літератури

1. Самойлов В.П. Новейшая японская техника щитовой проходки тоннелей / В.П. Самойлов, В.С. Малицкий. – М.: Иперіум Пресс, 2004. – 232 с.
2. Samoilov V.P. (2004) Novejshaja japonskaja tehnika shhitovoj prohodki tonnelej [The newest Japanese equipment of a panel board driving of tunnels] / V.P. Samoilov. – Moscow: Iperium Press, Russia.
3. Hambleton J.P. (2009) Modeling wheel-induced rutting in soils: Rolling / J.P. Hambleton, A. Drescher // Journal of Terramechanics. – Elsevier Ltd. – 2009. – № 46/6. – P. 35-47.
4. Krabbenhoft K. (2006) Shakedown of a cohesive-frictional half-space subjected to rolling and sliding contact / K. Krabbenhoft, A.V. Lyamin, S.W. Sloan // International journal of solids and structures. – Elsevier Ltd. – 2006. – P. 3998-4008.
5. Захаренко А.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов уплотнения катками грунтов и асфальтобетонных смесей: автореферат диссертации на соискание ученой степени д-ра техн. наук :05.05.04 / А.В. Захаренко. – Омск, 2005. – 44 с.
6. Zakharenko A. V. (2005) “Theoretically, experimental investigations of soils and compaction rollers asphaltobeton mix”, Abstract of doctor Sci. (Tech.) dissertation, 05.05.04 / A.V. Zakharenko. – Omsk: Siberian State Automobile and Highway Academy, Russia.

Надійшла до редакції 20.03.2014

С.В. Зайченко

УПЛОТНЕНИЕ КОНТУРА ТОННЕЛЯ МЕТОДОМ РОЛИКОВОГО ФОРМОВАНИЯ С УЧЕТОМ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВОГО МАССИВА

В статье представлена модель процесса формирования геотехнических свойств прилегающего контура горного массива подземной выработки методом роликового прессования с учетом зон различного типа деформаций и реологических свойств почвы. Смоделированы основные технологические параметры процесса обработки прилегающего контура тоннеля: распределение нормальных давлений и высоты зон различного типа деформаций в зависимости от основных прочностных и деформационных свойств горного массива, геометрии и особенностям пятна контакта роликового рабочего органа с обрабатываемым средой. Обоснован выбор расчетной модели процесса формирования свойств прилегающего контура грунтовых массивов роликовым методом с учетом возникающих процессов при деформации грунтов: возникновение упругой и пластической деформации, реологических свойств почвы.

Ключевые слова: строительство тоннелей, горный массив, почву, роликовый рабочий орган.

S. V. Zaychenko

FORMATION ADJACENT LOOP TUNNEL ROLLER COMPACTION METHOD BASED ON THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF THE SOIL MASS

This paper presents a model of the process of formation of geotechnical properties adjacent contour of the mountain massif of underground workings by roller compaction zones based on different types of strain and rheological properties of the soil. Simulated main technological parameters of processing circuit adjacent tunnel: the distribution of atmospheric pressure and altitude zones of different types of deformations based on fundamental strength and deformation properties hills geometry and features tread roller working body with the work environment. The choice of the design process model formation properties of the soil mass adjacent contour roller method based on processes occurring during deformation of soil: the emergence of elastic and plastic deformation rheological properties of the soil.

Keywords: construction of tunnels, hills, ground, rolling your body.