

РОЗРОБКА РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 624.21 + 624.19(066)

С.В. Зайченко, канд. техн. наук, доц.,
С.П. Шевчук, д-р техн. наук, проф.

Національний технічний університет України „Київський
політехнічний інститут“, м. Київ, Україна,
e-mail: Zstefv@fmail.com

ФОРМУВАННЯ ГЕОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРИЛЕГЛОГО КОНТУРУ ГІРСЬКОГО МАСИВУ ТУНЕЛЮ МЕТОДОМ РОЛИКОВОГО ПРЕСУВАННЯ

S.V. Zaichenko, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.,
S.P. Shevchuk, Dr. Sci. (Tech.), Professor

National Technical University of Ukraine “Kiev Polytechnic
Institute”, Kiev, Ukraine, e-mail: Zstefv@fmail.com

FORMATION OF GEOTECHNICAL PROPERTIES OF THE ROCK MASS ADJACENT TO TUNNELS BY ROLL PRESSING

Мета. Створити модель процесу формування геотехнічних властивостей прилеглого контуру гірського масиву підземної виробки методом роликового пресування з урахуванням зміцнення та утворення зони сповільненої пластичної деформації.

Методика. Змодельовані основні технологічні параметри процесу обробки прилеглого контуру тунелю: розподіл нормальних тисків і висоти ядра ущільнення залежно від основних міцнісних та деформаційних властивостей гірського масиву, геометрії та особливостей зони контакту роликового робочого органу з оброблюваним середовищем.

Результати. Обґрунтований вибір розрахункової моделі процесу формування властивостей прилеглого контуру гірських масивів роликовим методом з урахуванням виникаючих процесів при деформації ґрунтів: виникнення пружної та пластичної деформації, зміни характеристик ґрунту, виникнення ядра ущільнення. Встановлені основні етапи та взаємозв'язки параметрів при моделюванні процесу обробки прилеглої зони тунелю.

Наукова новизна. Полягає в розробці методу аналізу контактної взаємодії роликового робочого органу формуючого агрегату з масивом, з урахуванням зміни під час процесу стабілізації фізико-механічних властивостей оброблюваного середовища, метою якого є прогнозування необхідних напружень і глибини сформованого шару.

Практична значимість. Створені теоретичні основи формування геотехнічних властивостей прилеглого контуру підземної виробки роликовим методом з урахуванням особливостей деформації ґрунтів і контактної взаємодії робочого органу із середовищем, що обробляється, які дозволяють удосконалити технологію будівництва тунелів шляхом підсилення несучої здатності приконтурного масиву. Отримані результати дозволяють визначити параметри зони пружних і пластичних деформацій з метою встановлення її висоти та виникаючих напружень.

Ключові слова: *будівництво тунелів, гірський масив, ґрунти, роликовий робочий орган*

Постановка проблеми. Проектування та будівництво тунелів потребує вдосконалення технічних засобів і методів для подолання ділянок порушених і нестійких ґрунтів з метою забезпечення загальної стійкості конструкції. На стійкість підземних конструкцій і спосіб проведення гірничих робіт особливий вплив мають деформаційні й міцнісні властивості контактуючих ділянок гірського масиву. Властивості гірського масиву залежать від загальних умов утворення та техногенних причин, серед яких особливо слід відзначити руйнування цілісності контуру масиву під час проходки.

Сучасна технологія зведення тунелів глибокого або мілкого закладання в ускладнених геологічних умовах передбачає щитову проходку з багатошаровим 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 та руйнуванням цілісності контуру масиву при проходці. Спостереження й дослідження поведінки прилеглих ділянок виробок свідчать про концентрацію напружень і деформацій, що призводять до руйнування контуру виробки. Саме тому стабілізація прилеглого контуру виробки є важливим заходом для збільшення загальної стійкості конструкції й покращення експлуатаційних властивостей шляхом підсилення несучої здатності приконтурного масиву [1].

Застосування формування геотехнічних властивостей прилеглого контуру масиву гірської виробки шляхом роликового пресування дозволяє позбутися наведе-

них недоліків. Також слід відзначити суттєве зменшення трудомісткості та збільшення швидкості будівництва за рахунок повної механізації процесу обробки прилеглої контуру. Обробка контуру масиву роликів методом полягає в ущільненні середовища, що оброблюється, з можливістю додавання в'язучих компонентів і компонентів, що структурують, і, як наслідок, зміни густини останнього шляхом багаторазового періодично силового впливу роликів робочим органом, що перекочується. Процес обробки роликів методом споріднений із процесом проходки свердловин у ґрунті способом розкочування. Відмінність цих процесів полягає в ущільненні та вирівнюванні поверхні контуру прилеглої масиву (у випадку обробки роликів методом) і руйнуванні масиву з метою отримання порожнини у ґрунті (у випадку проходки свердловин у ґрунті способом розкочування).

Аналіз останніх досліджень. Розробкою нових технологій формування властивостей ґрунтів, дослідженням процесів, що супроводжують процес ущільнення ґрунтів різними способами, займалися велика кількість 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. Крдімова, М.О. Цитовича, М. Я. Хархути та ін.

Дослідження процесів ущільнення зводиться до визначення напружень і деформацій, що виникають у середовищі, яке оброблюється під час дії робочого органу. При розгляді процесу ущільнення вищезгаданих авторів слід відзначити переважну більшість плоских розрахункових моделей з наданням ґрунтовому масиву пружних і пластичних властивостей.

Також слід відзначити тривимірні дослідження контактної взаємодії індеторів, що котяться по пластичному середовищу, властивості якого представлено моделями Друкера-Прагера і Кулона-Мора, спрямовані на встановлення глибини осадки й напружень, що виникають на поверхні та в нескінченному півпросторі [2]. Ряд досліджень використовують апіорний розподіл контактних тисків при визначенні осадки та 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 невирішеної раніше частини загальної проблеми. У наведених дослідженнях властивості середовища, що деформується, представлені у вигляді сталих емпіричних величин, які не змінюються під час деформації, що не відповідає реальному процесу деформації ґрунтів. Під час деформації ґрунту відбувається перекомпоновка часток з утворенням нових зв'язків, що призводить до зміни основних деформаційних і міцнісних характеристик масиву, а останнє, у свою чергу, суттєво впливає на характер розподілу напружень і деформацій. Процес деформації ґрунту супроводжується різними етапами (фаза ущільнення, фаза зсувів), під час яких ґрунт поводить себе як пружно-пластичне тіло. При ущіль-

ненні під робочим органом утворюється зона ущільненого матеріалу, так зване ядро ущільнення, що характеризується практичною відсутністю пластичної деформації. Данні обставини обмежують застосування результатів попередніх досліджень, присвячених взаємодії роликів робочих органів з гірським масивом, без урахування наведених 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 роликів робочого органу з середовищем, що обробляється, з урахуванням зміцнення масиву та утворення зони уповільненої пластичної деформації.

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. Під час дії на ґрунтовий масив роликів робочого органу, середовище, що обробляється, у залежності від значень виникаючих деформацій поверхні, проявляє свої пружні та пластичні властивості. Початок взаємодії робочого органу (зона I, дуга AB , φ_1) (рис. 1) супроводжується пружними й пластичними деформаціями масиву, що відповідають фазі ущільнення та зсувів (фаза ущільнення й 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) та зоною ущільнення, що утворюється ядром (зона III).

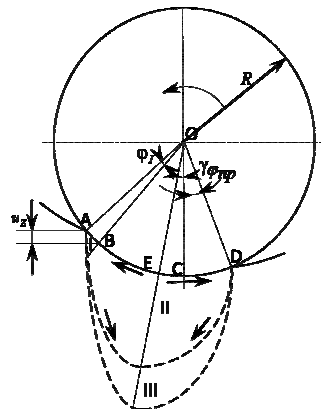


Рис. 1. Схема обробки гірського масиву роликів методом: I – зона ущільнення робочого органу; II – зона ядра ущільнення; III – зона ущільнення ядра ущільнення; R – радіус робочого органу; AB – дуга контакту робочого органу із зоною I; BD – дуга контакту робочого органу із зоною II; AE – дуга контакту із зоною втередження; ED – дуга контакту із зоною відставання; C – нижня точка контакту; u_z – осадка площадки зони I; φ_1 – кут дуги AB ; γ – нейтральний кут; $\varphi_{пр}$ – кут пружного відновлення

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, що контактують із робочим органом (дуга AD), зсуваються із зони тисків у сторони, вільні від силового впливу, утворюючи зони випередження (дуга AE) і відставання (дуга ED), що характеризуються нейтральним кутом γ . Кінцю контакту робочого органу із середовищем відповідає кут пружного відновлення – φ_{np} .

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

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

де φ_{τ} – кут внутрішнього тертя ґрунту.

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

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

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

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

Розглянемо рівновагу сегмента ядра шириною $d\varphi$, на який зі сторони робочого органу та ґрунтового масиву діють нормальні p_x і p'_x та дотичні тиски τ_x і τ'_x , що пов'язані між собою законом Кулона, 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. 2), отримаємо

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

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, що пов'язують розподіл головних напружень від дії розподіленого навантаження на пружній півпростір

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

де L' – ширина зони силового впливу; $h_{\bar{n}\delta}$ – середня висота ядра.

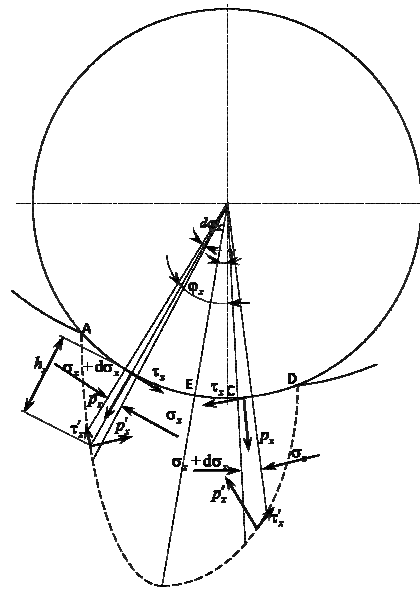


Рис. 2. Розрахункова схема моделювання процесу обробки гірського масиву роликівим методом: $h_x(\varphi_x)$ – висота ядра; σ_x – нормальне напруження; p_x і p'_x – нормальні складові контактних тисків дії робочого органу та середовища; τ_x і τ'_x – дотичні складові контактних тисків дії робочого органу та середовища; $d\sigma_x$ – прирощення нормального напруження; φ_x – кут, що визначає положення сегмента ядра; $d\varphi_x$ – ширина сегмента ядра

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

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

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

Диференційне рівняння (4) можливо розв'язати численним методом Ейлера, встановивши початкові умови. Початковими умовами для рішення рівняння є кут φ_I і напруження $p_x(\varphi_I)$, при яких ґрунти під дією навантажень переходять до фази пластичної течії між сформованим ядром ущільнення та оточуючим ядром масивом.

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

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

Скористаємося 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, що залежить від форми контакту; E_0 – модуль загальної деформації; μ_0 – коефіцієнт відносної загальної поперечної деформації; b – площа контакту.

Площа контакту b дорівнює

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

Після підстановки (7) у (6) і вирішення системи рівнянь (6) і (5), отримаємо значення кута φ_I

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

Слід відзначити, що у процесі обробки відбудеться зміна пористості ядра, що викличе зміну кута внутрішнього тертя від початкового значення $\varphi_{\tau 0}$ до кінцевого $\varphi_{\tau 0}$, а це, у свою чергу, призведе до зміни геометрії ядра. Зміна кута тертя φ_{τ} у залежності від кута взаємодії φ_x і координати положення перетину y уздовж довжини робочого органу може бути представлена залежністю

$$\varphi_{\tau}(\varphi_x, y) = \varphi_{\tau 0} + \frac{(\varphi - \varphi_x)(\varphi_{\tau 0} - \varphi_{\tau n})}{L(\varphi - \gamma)} y.$$

Рішення чисельним методом Ейлера диференціального рівняння розподілу нормального тиску по дузі контакту представлено на рис. 3 у вигляді поверхні та ізоліній розподілу тисків по зоні контакту для наступних умов: $\varphi_{\tau 0} = 15^\circ$; $\varphi_{\tau n} = 25^\circ$; $\mu = 0,3$; $R = 0,3$; $c = 0,2 \text{ МПа}$.

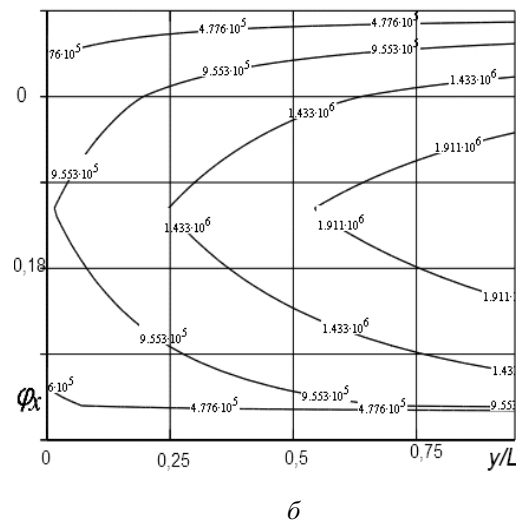
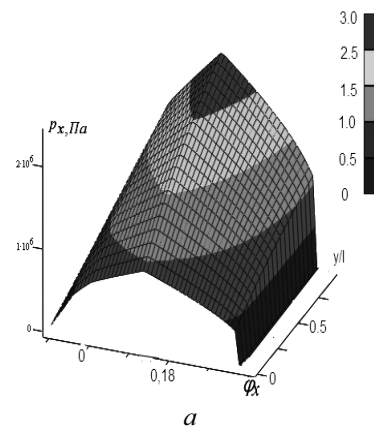


Рис. 3. Розподіл нормальних тисків по поверхні контакту: а – поверхня розподілу тисків; б – ізолінії розподілу тисків, Па

Аналіз отриманого розподілу тисків свідчить про збільшення нормального тиску як по дузі контакту φ_x , так і вздовж осі робочого органу y/L . Перетин поверхні розподілу нормальних тисків у напрямку руху робочого органу має опуклий характер, що відповідає реальному розподілу тисків при взаємодії жорсткого індентора циліндричної форми з площиною, що деформується. Теоретично отримані значення розподілу на кінці процесу формування властивостей прилеглої контуру виробки $y/L \rightarrow 1$ мають гостро конічну форму, що пояснюється відсутністю зони бокового розширення при моделюванні тривимірного процесу, а також не враховано присутність у нейтральній точці зони прилипання. Числові значення отриманих напружень достатні для ущільнення ґрунтів, що утворюють прилеглий контур транспортних, гідротехнічних і колекторних тунелів міст.

Зміна пористості ґрунтового масиву вздовж осі робочого органу призведе до збільшення значення зчеплення c , що призведе до збільшення виникаючих тисків. До зміни деформаційних і міцнісних характеристик також призведе додавання в'язучих компонентів і компонентів, що наповнюють.

Висновки та перспективи розвитку напрямку. Запропонований підхід аналізу силового впливу роликового робочого органу при обробці контуру підземної виробки дозволяє прогнозувати необхідні значення напружень, що виникають в ядрі ущільнення. Отриманні залежності форми ядра ущільнення та виникаючих тисків на периферії також дозволяють дослідити зону ущільнення III з метою встановлення її висоти й виникаючих у ній напружень.

Список літератури / References

1. Самойлов В.П. Новейшая японская техника щитовой проходки тоннелей / В.П. Самойлов, В.С. Малицкий. – М.: Иперим Пресс, 2004. – 232 с.

Samoilov, V.P. (2004), *Noveyshaya yaponskaya tekhnika shchitovoy prokhodki tonneley* [State-of-the-Art Japanese Equipment for Panel Board Driving of Tunnels], Iperium Press, Moscow, Russia.

2. Hambleton, J.P. and Drescher, A. (2009), “Modeling wheel-induced rutting in soils: Rolling”, *Journal of Terramechanics*, no.46/6, Elsevier Ltd., pp. 35–47.

3. Krabbenhoft, K., Lyamin, A.V. and Sloan, S.W. (2006), “Shakedown of a cohesive-frictional half-space subjected to rolling and sliding contact”, *International journal of solids and structures*, Elsevier Ltd., pp. 3998–4008.

4. Захаренко А.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов уплотнения катками грунтов и асфальтобетонных смесей: автореферат диссертации на соискание научной степени д-ра техн. наук : спец. 05.05.04 / А.В. Захаренко. – Омск, 2005. – 44 с.

Zakharenko, A.V. (2005), “Theoretical and experimental investigation of soils and hydrocarbon concrete compaction by rolling”, Abstract of Dr. Sci. (Tech.) dissertation, 05.05.04, Siberian State Automobile and Highway Academy, Omsk, Russia.

Цель. Создать модель процесса формирования геотехнических свойств прилегающего контура горного массива подземной выработки методом роликового прессования с учетом упрочнения и создания зоны замедленной пластической деформации.

Методика. Смоделированы основные технологические параметры процесса обработки прилегающего контура тоннеля: распределение нормальных давлений и высоты ядра уплотнения в зависимости от основных прочностных и деформационных свойств горного массива, геометрии и особенностей зоны контакта роликового рабочего органа с обрабатываемой средой.

Результаты. Обоснован выбор расчетной модели процесса формирования свойств прилегающего контура горных массивов роликовым методом с учетом возникающих процессов при деформации грунтов: возникновения упругой и пластической деформации, изменения характеристик почвы, возникновения ядра уплотнения. Установлены основные этапы и взаимосвязи параметров при моделировании процесса обработки прилегающей зоны тоннеля.

Научная новизна. Заключается в разработке метода анализа контактного взаимодействия роликово-

го рабочего органа формирующего агрегата с массивом с учетом изменения в процессе стабилизации физико-механических свойств обрабатываемой среды, целью которого является прогнозирование необходимых напряжений и глубины сформированного слоя.

Практическая значимость. Созданы теоретические основы формирования геотехнических свойств прилегающего контура подземной выработки роликовым методом с учетом особенностей деформации грунтов и контактного взаимодействия рабочего органа с обрабатываемой средой, которые позволяют усовершенствовать технологию строительства тоннелей путем усиления несущей способности приконтурного массива. Полученные результаты позволяют определить параметры зоны упругих и пластических деформаций с целью установления ее высоты и возникающих напряжений.

Ключевые слова: строительство тоннелей, горный массив, почвы, роликовый рабочий орган

Purpose. To create the model of the formation process of geotechnical properties of the rock mass adjoining underground excavation by roller compaction method taking into account hardening and slow plastic deformation zone creating.

Methodology. We have simulated the main technological parameters of the tunnel adjoining rock mass treatment: distribution of standard pressure and bulb of pressure height depending on deformation behavior, and strength of rock; and geometry and features of contact zone between roller working element and the surface being treated.

Findings. We have substantiated the choice of the computational model of the adjoining rock contour properties formation by roller method taking into account the emerging soil deformation processes: appearance of elastic and plastic deformation, changing of soil characteristics, and occurrence of core compaction. We have determined the main stages and the interrelations between the parameters of modeling of the tunnel adjoining zone treatment process.

Originality. We have developed the method of analysis of contact interaction between the roller working body of molding machine and rock. It takes into account the changes in the stabilization process of physical and mechanical properties of the treated medium. It serves for prediction of the required pressure and depth of the formed layer.

Practical value. The theoretical basis for the tunnel adjoining rock geotechnical properties formation by roller method taking into account the peculiarities of soil deformation and contact interaction of working body with the environment allows improving the tunnel construction technology by strengthening the carrying capacity of adjoining rock. The results obtained allow determining parameters of the elastic and plastic deformations zone in order to establish its height and stresses.

Keywords: construction of tunnels, rock massif, soils, roller working body

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук Н.В. Зувєською. Дата надходження рукопису 05.06.13.