

УДК 539.3

Й. Лучко, докт. техн. наук; Ю. Гнатів, канд. фіз.-мат. наук

Львівська філія Дніпропетровського національного університету  
залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна

## НАПРУЖЕНИЙ СТАН ҐРУНТОВОГО МАСИВУ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ ВИРОБКИ СПОСОБОМ УЩІЛЬНЕННЯ

*Резюме.* Запропоновано математичну модель руху ґрунтових частинок при проведенні горизонтальної виробки шляхом ущільнення ґрунтового масиву. Приймається, що ґрунт – невагоме ізотропне середовище, яке володіє тертям і зчепленням та задовольняє умови плоского напруженого стану. Припускається, що деформації та напруження розподілені по контуру виробки рівномірно. Досліджено напружено-деформований стан ґрунтового масиву в околі виробки.

*Ключові слова:* горизонтальна виробка, ущільнення ґрунтового масиву, напружений стан.

J. Luchko, Yu. Hnativ

## THE STRESS STATE OF THE GROUND ARRAY DURING REALIZATION OF HORIZONTAL MAKING BY METHOD OF COMPRESSION

*The summary.* The mathematical model of motion of the ground particles during realization of the horizontal making by the compression of the ground array is offered. It is accepted that soil is a weightless isotropic environment which owns a friction and coupling and satisfies the terms of the flat stress state. It is assumed that deformations and stresses are up-diffused for contour of making evenly. The strain-stress state of the ground array in the zone making is investigated.

*Key words:* horizontal making, compression of the ground array, stress state.

**Постановка проблеми.** Горизонтальні виробки широко проводяться з метою прокладання в них підземних комунікацій. У зв'язку з цим є актуальною проблема дослідження механічних процесів, які відбуваються у ґрунтовому масиві при проведенні виробок. Це дослідження є основою вибору допустимих параметрів виробок і забезпечення мінімальної енергоємності та високої продуктивності процесів їх прокладання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Широке дослідження механічних процесів ущільнення масиву, які швидко протікають, відображені в працях [1–8]. Теоретичні дослідження залежності напружень у масиві від швидкості переміщення ґрунтових частинок для випадків проникнення твердого тіла в пружно-в'язке середовище викладено в роботах [9, 10].

Інший напрям дослідження процесів, яке не враховує впливу швидкості проникнення твердого тіла в суцільне середовище, відображено у працях [11–16].

Аналізовані в роботах [17–20] механічні процеси, викликані проникненням твердого тіла в ґрунтовий масив, відрізняються від процесів, які досліджувалися в перелічених вище працях. Порівняно з роботами [1–10] у працях [17–20] швидкість зміни напружень на кілька порядків нижча, а порівняно з роботами [11–16] – це динамічні процеси.

Механічні процеси в ґрунтовому масиві при проведенні виробки способом ущільнення є дуже складними і залежать від характеристик ґрунту й технологічних параметрів розглядуваного способу. Врахування усіх характеристик ґрунтового масиву

в математичній моделі процесів дуже ускладнило б розв'язування відповідної системи диференціальних рівнянь або призвело б до неможливості побудови розв'язку цієї системи. Тому в моделях процесів [17–20] відображено вплив основних характеристик (густина масиву, коефіцієнт зчеплення ґрунтових частинок, кут внутрішнього тертя, коефіцієнт стиску ґрунту) без урахування природної вологості, пористості, структури та інших властивостей ґрунтового масиву.

Із технологічних параметрів проведення виробок ураховано в математичних моделях процесів [17–20] швидкість проведення виробки, її діаметр, глибину закладання, конусність робочого органу в установках, які проколюють і протискають ґрунт; частоту обертання пристрою, який розкатує, в поєднанні з частотою обертання конічних катків цього пристрою, їх конусність, діаметри та кількість.

Указані технологічні параметри можуть змінюватися в широкому діапазоні. Тому в працях [17–20] шукаються такі їх значення, які в сукупності з фізико-механічними характеристиками ґрунту забезпечують високу продуктивність і мінімальну енергоємність процесів прокладання виробок.

Хоча виконано широкі дослідження механічних процесів, які відбуваються у ґрунтовому масиві при проведенні виробок, проте ці процеси вивчені недостатньо.

**Метою роботи** є дослідження напруженого стану ґрунту при проведенні горизонтальної виробки шляхом ущільнення.

**Методика й результати досліджень.** Прийmemo, що ґрунтовий масив, в якому проводиться горизонтальна виробка способом ущільнення, є ізотропним невагомим середовищем, яке володіє тертям і зчепленням та перебуває в умовах плоского напруженого стану. Припустимо, що розподіл деформацій, а отже, і напружень по контуру виробки відбувається рівномірно, а ущільнена область ґрунту не обертається. У цьому разі рівняння руху ґрунтових частинок мають вигляд [20]

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = \rho \left( \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_\theta^2}{r} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + 2 \frac{\tau_{r\theta}}{r} = \rho \left( \frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_r v_\theta}{r} \right), \quad (2)$$

де  $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$  – відповідно радіальне, тангенціальне та дотичне напруження;  $r, \theta$  – полярні координати;  $v_r, v_\theta$  – радіальна й тангенціальна складові швидкості руху частинок ґрунту;  $\rho$  – густина масиву;  $t$  – час.

Рівняння (1), (2) доповнимо співвідношеннями [10]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_r \frac{\partial \rho}{\partial r} + \frac{\rho}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) = 0, \quad (3)$$

$$(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + 4\tau_{r\theta}^2 = \sin^2 \varphi (\sigma_r + \sigma_\theta + 2kctg\varphi)^2, \quad (4)$$

$$\frac{2\tau_{r\theta}}{\sigma_r - \sigma_\theta} = \frac{\frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r}}{\frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r}}. \quad (5)$$

Тут  $\varphi$  – кут внутрішнього тертя;  $k$  – коефіцієнт зчеплення ґрунту. Рівняння (3) відповідає умові нерозривності стискуваного середовища, співвідношення (4) – умова пластичності Треска – Сен-Венана, рівняння (5) виражає умову збігання напрямку максимальної швидкості деформації зсуву з напрямком лінії ковзання.

Напруження  $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$  будемо шукати у вигляді

$$\begin{aligned}\sigma_r &= P + \cos \varphi \cos 2\beta (P \operatorname{tg} \varphi + k), \\ \sigma_\theta &= P - \cos \varphi \cos 2\beta (P \operatorname{tg} \varphi + k), \\ \tau_{r\theta} &= \cos \varphi \sin 2\beta (P \operatorname{tg} \varphi + k),\end{aligned}\quad (6)$$

де  $P = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2}$  – середнє напруження;  $\beta$  – кут між напрямком максимального головного напруження і додатним напрямком координатної осі  $r$ . Співвідношення (6) задовольняють умову (4), а умова (5) перетворюється до вигляду

$$\operatorname{tg} 2\beta = \frac{\frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r}}{\frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r}}.\quad (7)$$

Залежність густини ґрунту від середнього напруження виражається з деяким наближенням формулою [10]

$$\rho = \rho_0(1 + b_0 P).\quad (8)$$

Тут  $b_0$  – коефіцієнт стиску ґрунту.

Прийемо, що  $\beta$  – стала величина. Тоді, враховуючи вирази (6), (8), зведемо рівняння (1) – (3) до вигляду

$$(1 + \sin \varphi \cos 2\beta) \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{2 \cos \varphi \cos 2\beta}{r} (P \operatorname{tg} \varphi + k) = \rho \left( \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_\theta^2}{r} \right),\quad (9)$$

$$\sin \varphi \sin 2\beta \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{2 \cos \varphi \sin 2\beta}{r} (P \operatorname{tg} \varphi + k) = \rho \left( \frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_r v_\theta}{r} \right),\quad (10)$$

$$\frac{b_0}{1 + b_0 P} \left( \frac{\partial P}{\partial t} + v_r \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) = 0.\quad (11)$$

Із рівняння (7) і умови, що швидкості  $v_r$  і  $v_\theta$  на нескінченності дорівнюють нулю, отримуємо

$$v_\theta = v_r \operatorname{tg} 2\beta.\quad (12)$$

Ураховуючи вираз (12), перетворимо рівняння (9) – (11) до вигляду

$$\frac{B_1}{r} (P \operatorname{tg} \varphi + k) = \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial v^2}{\partial r} + B_2 \frac{v^2}{r} \right),\quad (13)$$

$$\frac{\partial P}{\partial r} = -\rho (1 + \operatorname{tg}^2 2\beta) \frac{v^2}{r},\quad (14)$$

$$\frac{b_0}{1 + b_0 P} \left( \frac{\partial P}{\partial t} + v \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v) = 0,\quad (15)$$

де  $v = v_r$ ;  $B_1 = 2 \cos \varphi \cos 2\beta$ ;  $B_2 = 1 + \frac{\sin \varphi}{\cos 2\beta}$ .

Оскільки доданок  $b_0 P$  малий порівняно з одиницею, то ним будемо нехтувати. Припустимо, що рух ґрунтових частинок стаціонарний. З урахуванням прийнятого запишемо рівняння (13)–(15) у вигляді

$$\frac{B_1}{r} (P \operatorname{tg} \varphi + k) = \rho_0 \left( \frac{1}{2} \frac{dv^2}{dr} + B_2 \frac{v^2}{r} \right),\quad (16)$$

$$\frac{dP}{dr} = -\rho_0(1 + \operatorname{tg}^2 2\beta) \frac{v^2}{r}, \quad (17)$$

$$b_0 v \frac{dP}{dr} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr}(rv) = 0. \quad (18)$$

Із співвідношень (17), (18) випливає рівняння

$$\frac{d}{dr}(rv) = b_0 \rho_0 (1 + \operatorname{tg}^2 2\beta) v^3. \quad (19)$$

Інтегруючи рівняння (19), отримуємо

$$v^2 = \frac{1}{b_0 \rho_0 (1 + \operatorname{tg}^2 2\beta) (1 + Cr^2)}. \quad (20)$$

Беручи до уваги вираз (20), із рівняння (16) отримуємо

$$P = \operatorname{ctg} \varphi \left\{ \frac{1}{B_1 b_0 (1 + \operatorname{tg}^2 2\beta)} \left[ -\frac{Cr^2}{(1 + Cr^2)^2} + \frac{B_2}{1 + Cr^2} \right] - k \right\}. \quad (21)$$

Сталу  $C$  визначимо із граничної умови

$$\sigma_r|_{r=r_0} = \sigma_0, \quad (22)$$

де  $r_0$  – радіус контуру виробки.

Проведені дослідження [20] дозволяють вважати, що кут  $\beta$  близький до  $45^\circ$  незалежно від зміни коефіцієнта стиску ґрунту й технологічних параметрів.

Числові дослідження проведемо при таких значеннях параметрів:  $r_0 = 0.3$  м;  $\sigma_0 = -0.8$  МПа;  $k = 0.0021$  МПа;  $\varphi = 40^\circ$ ;  $\beta = 44^\circ$ ;  $b_0 = 0.01$  МПа<sup>-1</sup>. Зміну напружень  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\tau_{r\theta}$  і середнього напруження  $P$  уздовж радіальної координати  $r$  наведено на рис. 1, 2.

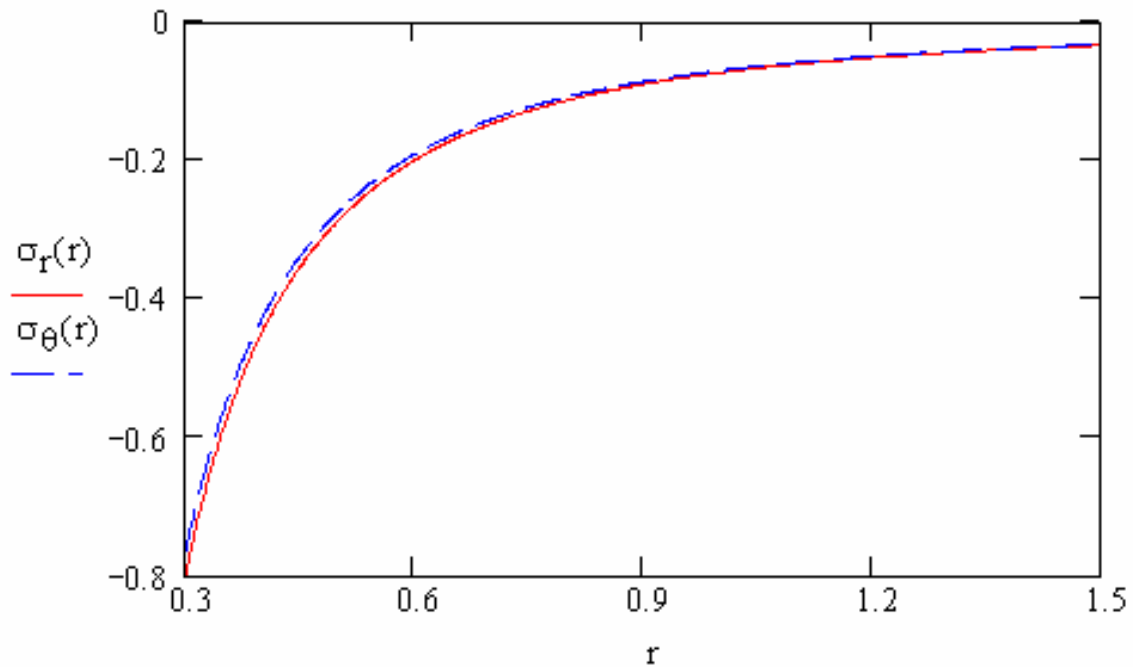


Рисунок 1. Розподіл нормальних напружень, МПа, уздовж радіальної координати  $r$ , м

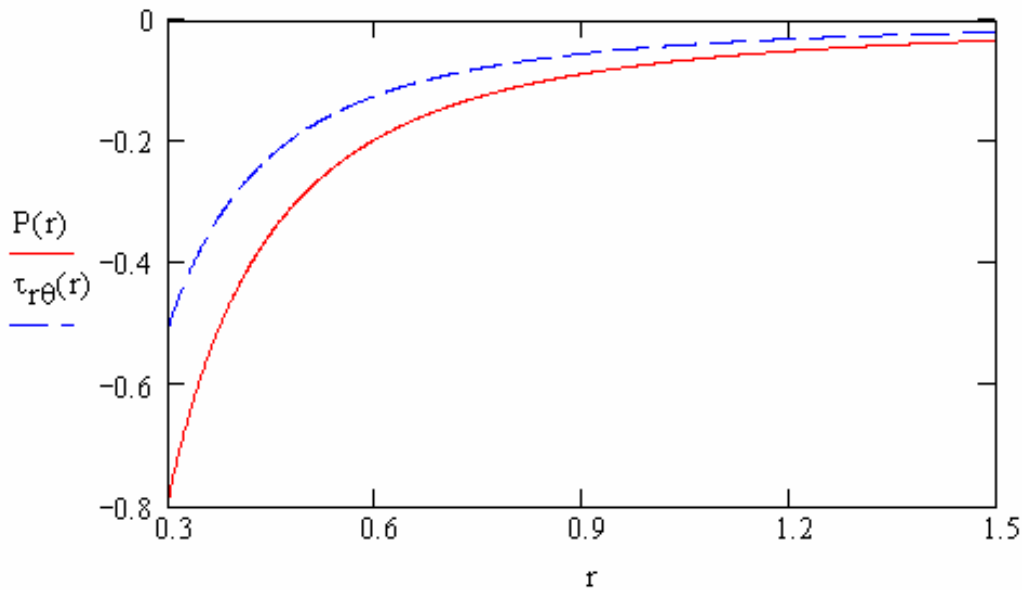


Рисунок 2. Зміна середнього і дотичного напружень, МПа, уздовж радіальної координати  $r$ , м

**Висновки.** Величина напружень спадає при зростанні значення радіальної координати. Нормальні напруження мають вищий рівень, ніж дотичні напруження. Значення тангенціальних напружень близькі до відповідних значень радіальних напружень. На напружений стан значний вплив має тиск, прикладений уздовж контуру виробки.

#### Література

1. Кучерявый, Ф.И. К расчету напряженно-деформированного состояния массива при взрывании цилиндрического заряда [Текст] / Ф.И. Кучерявый, А.Н. Коломиец, Ю.Ф. Кучерявый // Изв. вузов. Горный журн. – 1974. – № 12. – С. 51–55.
2. Рахматуллин, Х.А. Вопросы динамики грунтов [Текст] / Х.А. Рахматуллин, А.Я. Сагомоян, Н.А. Алексеев. – М., 1964. – 192 с.
3. О распределении напряжений в массиве горных пород при взрыве [Текст] / М.А. Шинкарев, М.Ш. Володарская, С.Ч. Чернов, В.И. Машуков // Изв. вузов. Горный журн. – 1975. – № 12. – С. 28–29.
4. Ching, H. Penetration of projective into terrestrial target / H. Ching, P. Pete // J. Eng. Mech. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng. – 1978. – N 2. – P. 104.
5. Ichiro, I. Blasting by specially made lvu explosives for urban works / I. Ichiro, S. Koichi, T. Chikaosa // Trans. Jap. Cos. Eng. – 1973. – N 4. – P. 28.
6. Jankelevsky, D. Z. Interaction of soil and penetrating projective / D. Z. Jankelevsky // Q. Geotechn. Eng. Div. Proc. Amer. Civ. Eng. – 1982. – N 3. – P. 4.
7. Kar, A. K. Projective penetration of earth media / A. K. Kar // Trans. 4-th Int. Conf. Struct. Mech. Reach Technol. San-Francisco Calif. – 1977. – Vol. 1(b). – P. 32–35.
8. Spector, M. Principles of coil-tool interaction / M. Spector // J. Terramech. – 1981. – Vol. 18, N 1. – P. 26.
9. Баренблат, Г.И. Теория нестационарной фильтрации жидкостей и газа [Текст] / Г.И. Баренблат, В.М. Ентов, В.М. Рыжик. – М., 1972. – 186 с.
10. Гениев, Г.А. Динамика пластической и сыпучей сред [Текст] / Г.А. Гениев, М.И. Эстрин. – М.: Стройиздат, 1972. – 250 с.
11. Березанцев, В.Г. Определение предельного сопротивления песчаных грунтов под концом сваи с помощью статической пенетрации [Текст] / В.Г. Березанцев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1966. – № 4. – С. 25–27.
12. Березанцев, В.Г. Расчет оснований сооружений [Текст] / В.Г. Березанцев. – М., 1970. – 168 с.
13. Разоренов, В. Ф. Пенетрационные испытания грунтов [Текст] / В.Ф. Разоренов. – М., 1980. – 174 с.
14. Тимофеев, С.С. Полевые методы исследования строительных свойств грунтов [Текст] / С.С. Тимофеев, Ю.Г. Трофименков, Л.Н. Воробков. – М., 1964. – 198 с.
15. Тимофеев, С. С. О формах грунтового ядра под жесткими штампами [Текст] / С.С. Тимофеев // Исследование по строительным конструкциям и строительной механике. – Томск, 1977. – С. 81–92.
16. Трофименков, Ю.Г. Полевые методы исследования строительных свойств грунтов [Текст] / Ю.Г. Трофименков, Л.Н. Воробков. – М., 1981. – 214 с.

17. Васильев, С.Г. Контактные напряжения при расширении скважин механическим способом [Текст] / С.Г. Васильев. – М., 1985. – 86 с. – Рукопись деп. в ВНИИС, № 6397.
18. Васильев, С.Г. Подземное строительство неглубокого заложения [Текст] / С.Г. Васильев. – Львов, 1980. – 124 с.
19. Васильев, С.Г. Прокладка подземных коммуникаций закрытым способом [Текст] / С.Г. Васильев // Пром. строительство. – 1988. – № 2. – С. 45–49.
20. Васильев, С.Г. Технологические процессы проведения горизонтальных выработок [Текст] / С.Г. Васильев, А.В. Лещенко. – Львов: Свит, 1993. – 160 с.

*Отримано 14.06.2011*