

УДК 625.73

## ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТІВ ҐРУНТОУЩІЛЬНЮВАЛЬНИМ ОБЛАДНАННЯМ З ПОВЕРХНЯМИ БЛОКУВАЛЬНОГО ТИПУ

П.Г. Анофрієв, доц., к.т.н., В.Е. Черкудінов, здоб.,  
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна

*Анотація.* Розглянуто фізико-математичну модель, яка дасть можливість оцінити ступінь ущільнення ґрунтів профільними поверхнями і порівняти її з показниками існуючих машин. Також при обробці результатів можна виділити параметри, що дозволяють оптимізувати процес ущільнення ґрунту.

**Ключові слова:** ґрунтоущільнювальне обладнання, блокування, робочий орган, ущільнення, профіль.

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ ГРУНТОУПЛОТНЯЮЩИМ ОБОРУДОВАНИЕМ С ПОВЕРХНОСТЯМИ БЛОКИРУЮЩЕГО ТИПА

П.Г. Анофриев, доц., к.т.н., В.Э. Черкудинов, соиск.,  
Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта  
имени академика В. Лазаряна

*Аннотация.* Рассмотрена физико-математическая модель, которая даст возможность оценить степень уплотнения грунтов профильными поверхностями и сравнить ее с показателями существующих машин. Также при обработке результатов можно выделить параметры, которые позволяют оптимизировать процесс уплотнения грунта.

**Ключевые слова:** ґрунтоуплотняющее оборудование, блокирование, рабочий орган, уплотнение, профиль.

## A PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODEL OF SOIL COMPACTION WITH BLOCKING- SURFACE SOIL-COMPACTING EQUIPMENT

P. Anofriev, Cand., Eng. Sc., Assoc. Prof., V. Cherkudinov, competitor,  
Dnipropetrovsk National University of Railway Transport

*Abstract.* The considered physical and mathematical model allows evaluating the degree of soil compaction made by rammers and comparing it to indexes of existing machines. During result processing, parameters can be identified to improve soil compacting.

**Key words:** soil-compacting equipment, blocking, working element, compaction, rammer, profile.

### Вступ

При розробці математичної моделі ущільнення ґрунту ґрунтоущільнювальним обладнанням з поверхнями блокувального типу слід врахувати деякі чинники, а саме співвідношення дотичних і нормальних напружень у місцях контакту поверхні робочого органа з

ґрунтом, вплив режиму роботи поверхні через коефіцієнт зниження нормального питомого опору ґрунту при ущільненні його на певну глибину залежно від ковзання сумарної площі поверхні робочого органа по ґрунту та зміни питомого тиску при контакті робочого органа, з урахуванням глибини занурення у ґрунт блокуючих елементів.

### Аналіз публікацій

У науково-технічній літературі розглядаються математичні моделі взаємодії ґрунтоущільнювального обладнання тільки з традиційним плоским виконанням поверхні робочої плити. Відомості щодо профільного виконання робочої поверхні з акцентом на блокуючу дію на ґрунт відсутні.

### Мета і постановка задачі

Метою роботи є розробка фізико-математичної моделі ущільнення ґрунтів, яка дасть можливість оцінити ступінь ущільнення ґрунтів при використанні ґрунтоущільнювального обладнання з поверхнями блокувального типу.

### Фізико-математична модель ущільнення ґрунтів

Математичний опис процесу взаємодії ґрунтоущільнювального робочого органа з ґрунтом за відомих розмірних параметрів навантажень, а також фізико-механічних властивостей ґрунту, дозволяє розрахунковим шляхом визначити всі оцінювальні показники і характеристики цього процесу у функції параметрів навантаження, глибини ущільнення і т.д.

На основі аналізу науково-технічної літератури передбачається, що ефективна робота з ущільнення здійснюється при коефіцієнтах ущільнення  $k_{\text{ущ}} = 0,90\text{--}0,92$ .

У результаті теоретичних і експериментальних досліджень ущільнення ґрунтів [2] отримано формулу для визначення коефіцієнта ущільнення  $k_{\text{ущ}}$  [ $\text{м}^2/\text{МН}$ ]

$$k_{\text{ущ}} = \frac{h(1 + \varepsilon_0)}{Hq_{\text{max}}}; \quad (1)$$

де  $q_{\text{max}}$  – середній максимальний тиск робочого органа на ґрунт,  $\text{МН}/\text{м}^2$

$$q_{\text{max}} = \frac{\sum q_{\text{max}_i}}{n_i};$$

$q_{\text{max}_i}$  – максимальний тиск робочого органа на ґрунт під  $i$ -м опорним профілем,  $\text{МН}/\text{м}^2$ ;  $n_i$  – кількість опорних профілів;  $H$  – найбільша глибина ущільнення шару ґрунту від

$q_{\text{max}} (H \approx 2b)$ ,  $\text{м}$ ;  $\varepsilon_0$  – коефіцієнт пористості до початку деформації, який являє собою співвідношення об'єму порот у ґрунті до об'єму, який займають тільки ґрунтові частки [5];  $h$  – загальна глибина ущільнення ґрунту (деформація ґрунту),  $\text{м}$ .

Загальна глибина деформації ґрунту  $h$  – це сума деформацій пружної  $h_1$  та зсуву часток  $h_2$  [3]

$$h = h_1 + h_2.$$

Деформація зсуву визначається несучою здатністю ґрунту  $q_s$  і залежить від загальної деформації.

Деякі джерела [3], [5] описують цей зв'язок таким співвідношенням

$$h_2 = h \frac{q_0}{q_s},$$

де  $q_0$  – середній тиск на ґрунт,  $\text{МН}/\text{м}^2$ .

З урахуванням перетворень отримуємо вираз

$$h = h_1 \frac{q_s}{q_s - q_0}. \quad (2)$$

Вертикальна деформація ґрунту виникає в основному під дією максимальних нормальних напружень  $\sigma$ , [1], [4]. Максимальне напруження  $\sigma_z$  залежить від середнього питомого тиску робочого органа на ґрунт  $q_0$ , довжини опорної поверхні робочого органа  $L$ , загальної ширини ділянок опорних профілів  $b$  на різних горизонтальних перерізах  $z$  [2]

$$\sigma_z = q_0 \frac{L \cdot b}{L \cdot b + \mu(L - b)z + \frac{z^2}{\mu}}, \quad (3)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт, який характеризує вплив властивостей ґрунту (тип, вологість, ступінь розпушування) на розподіл напружень за товщиною (коефіцієнт Пуассона для ґрунтів) [5]. Якщо припустити, що пружна деформація лінійно залежить від напружень (рис. 1)

$$dh_1 = \frac{\beta \sigma_z dz}{E_0}, \quad (4)$$

де  $E_0$  – модуль деформації ґрунту за відсутності зсувів, МПа;  $\beta$  – коефіцієнт, який характеризує бічне розширення ґрунту [5]

$$\beta = 1 - \frac{2\mu}{1-\mu}$$

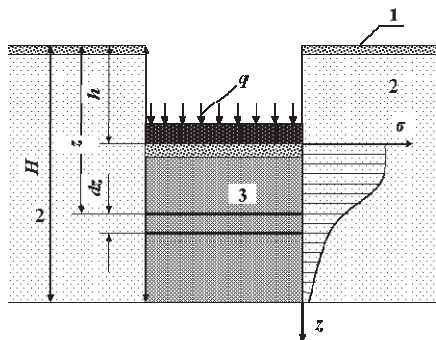


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення деформації при ущільненні ґрунту: 1 – поверхня ґрунту; 2 – неущільнений ґрунт; 3 – ущільнений ґрунт

Вирішуючи рівняння (3) і (4) та інтегруючи результат у межах від  $z = 0$  до  $z = H$ , отримуємо формулу для визначення пружної деформації ущільнення ґрунту [4]

$$h_1 = \frac{2x\beta b q_0}{E_0 \sqrt{4\frac{x}{\mu} - \mu^2(x-1)^2}} \times \arctg \frac{\sqrt{4\frac{x}{\mu} - \mu^2(x-1)^2}}{2\frac{x b}{H} + \mu(x-1)} \quad (5)$$

Глибина занурення робочого органа у ґрунт

$$h_1 = \left( \frac{\frac{2x\beta b}{E_0 \sqrt{4\frac{x}{\mu} - \mu^2(x-1)^2}} \times \arctg \frac{\sqrt{4\frac{x}{\mu} - \mu^2(x-1)^2}}{2\frac{x b}{H} + \mu(x-1)}}{\frac{q_{\max} q_s}{q_s - q_0}} \right) \quad (6)$$

Визначивши вираз у дужках через  $\alpha$ , отримуємо

$$h = \alpha \frac{q_s}{q_s - q_{\max}} q_{\max}$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт, який характеризує опір ґрунту,  $\text{м}^3/\text{МН}$ ;

$$\alpha = \frac{2\beta L}{E_0 \sqrt{4\frac{x}{\mu} - \mu^2(x-1)^2}} \times \arctg \frac{\sqrt{4\frac{x}{\mu} - \mu^2(x-1)^2}}{x + \mu(x-1)}$$

де  $x$  – коефіцієнт, який характеризує співвідношення довжини опорної поверхні  $L$  до її ширини  $b$ .

### Висновок

Отримане рівняння (1) дасть можливість оцінити ступінь ущільнення ґрунтів при використанні ґрунтоущільнювального обладнання з поверхнями блокувального типу – обґрунтувати раціональні параметри поверхні робочого органа та дозволить інтенсифікувати процес ущільнення ґрунту.

### Література

1. Герасимов Ю.Ю. Экологическая оптимизация технологических процессов и машин для лесозаготовок / Ю.Ю. Герасимов, В.С. Сюнев. – Йоэнсуу: Изд-во университета Йоэнсуу, 1998. – 178 с.
2. Лобанов В.Н. Определение напряжений в толще ґрунта под двигателем гусеничных машин / В.Н. Лобанов // Вклад ученых и специалистов в национальную экономику: материалы НТК. – Брянск: БГИТА. – 2001. – Т. 1. – С. 95–96.
3. Агейкин Я.С. Вездеходные и комбинированные двигатели (теория и расчет) / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.
4. Лобанов В.Н. Исследование взаимодействия гусеничного двигателя с деформируемым ґрунтом / В.Н. Лобанов // Оптимальное взаимодействие: материалы симпозиума по террамеханике. – Суздаль, 1992. – С. 93–97.
5. Бабков В.Ф. Основы ґрунтоведения и механики ґрунтов / В.Ф. Бабков, В.М. Безрук. – М.: Высшая школа, 1976. – 328 с.

Рецензент: Є.С. Венцель, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 28 квітня 2014 р.