

УДК 624.138

**В.А. Басараб,**

канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0003-2888-7398

*Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ*

## **ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТУ**

*Стаття присвячена визначенню технологічних параметрів ущільнення ґрунтів котками з урахуванням властивостей ґрунту в умовах будівництва. Ущільнення ґрунту відбувається за рахунок певних силових навантажень на ґрунт. На сьогоднішній день розроблено достатньо методів визначення технологічних параметрів процесу ущільнення, проте методів досліджень, що розглядають систему ґрунт-машина-технологічні параметри, існує небагато. Підкреслено актуальність процесу ущільнення ґрунту, що в кінцевому результаті, визначає якість будівельної продукції в цілому. Наведено основні фізико-механічні властивості ґрунту а також технологічні параметри процесу ущільнення. Проведено аналіз дискретної математичної моделі взаємодії котка з ґрунтом основи з ціллю визначення технологічних параметрів процесу ущільнення ґрунтів в умовах будівельного виробництва. Для описання властивостей ґрунту використано реологічну модель. Складено диференційні рівняння взаємодії котка з ґрунтом основи. Для розв'язання диференціальних рівнянь запропоновано чисельний метод розрахунку. Визначено основні технологічні параметри процесу ущільнення ґрунту котками – товщина шару ґрунту, що ущільнюється, кількість проходок котка а також швидкість руху котка. Запропоновано методологію теоретико-експериментальних досліджень взаємодії котка з ґрунтом основи з метою уточнення математичної моделі і знаходження технологічних параметрів процесу ущільнення. Експериментальні методи досліджень ґрунтуються на визначенні напружено-деформованого стану ґрунту а також на проведенні Фур'є-аналізу експериментальних даних. Фур'є-аналіз експериментальних даних дає можливість проаналізувати якісний енергетичний спектр взаємодії котка з ґрунтом і призначити раціональні амплітудно-частотні характеристики процесу ущільнення. Експериментальні дослідження дають можливість отримати такі реологічні властивості ґрунту як пружність, в'язкість, коефіцієнт непружого опору та ін. Наведено основні рекомендації по вибору методу ущільнення в залежності від виду ґрунту.*

**Ключові слова:** *ущільнення ґрунту, технологічні параметри процесу ущільнення, будівельне виробництво, реологічна модель, Фур'є-аналізу експериментальних даних.*

**Вступ.** В умовах сьогодення під забудову, з метою збереження сільськогосподарських земель, відводять території складені слабкими ґрунтами, колишніми сміттєзвалищами, відвалами з не ущільнених ґрунтів, які інколи накривають заболочені території, а тому часто такі ґрунти вимагають ущільнення.

Технічні можливості ХХІ ст. дозволяють переміщувати десятки мільйонів кубічних метрів ґрунту для створення нових ландшафтних та насичених

штучними водоймами територій під забудову. Якісне ущільнення ґрунтів, в цьому випадку, відіграє провідну роль.

Ущільнення ґрунтів – один із найважливіших процесів при влаштуванні зворотних засипок. Якісне ущільнення ґрунту, в кінцевому результаті, визначає якість будівельної продукції в цілому.

**Актуальність.** Досить часто недостатня щільність ґрунту призводить до надмірних витрат коштів та праці через неввірно вибраний спосіб ущільнення. Також, слід зазначити, важливим аспектом процесу ущільнення у відповідності з технологічними умовами є вибір того чи іншого засобу механізації, що використовується для ущільнення ґрунту [4, 5, 7, 8, 9]. При визначенні технологічних параметрів ущільнюючих машин однією з умов є коректний вибір математичної моделі ущільнюваного середовища. Обумовлюється це тим, що забезпечення необхідних параметрів ущільнення визначається врахуванням всіх сил опору, які в свою чергу оцінюються залежностями між напруженням  $\sigma$  та деформацією  $\varepsilon$  середовища. На сьогоднішній день у світі існує достатньо велике розмаїття котків, трамбівок, віброплит та іншого ущільнюючого обладнання, проте питання оптимального вибору механізованих комплексів, які дають можливість за умов мінімізації фінансових ресурсів та часу отримати максимальну продуктивність, залишається актуальним.

**Основний матеріал.** В умовах виконання земляних робіт на будівництві (зведення гребель і дамб, ґрунтового полотна дороги, засипки пазах котлованів тощо) виникає необхідність одержати ґрунти з заданими фізико-механічними властивостями. Для створення основи споруди з достатньою несучою здатністю, або влаштування якісного насипу ґрунту доводять до проектної щільності. Із збільшенням щільності ґрунту зростає його міцність, водонепроникність, опір розмиванню, збільшується статична стійкість споруди.

Ущільнення ґрунту відбувається за рахунок певних силових навантажень на ґрунт. Динамічний характер навантаження ґрунту в умовах ущільнення характеризується вібраційним, ударним, динамічним імпульсним, комбінованим та іншими видами силового впливу. На відміну від машин статичної дії динамічний характер навантаження принципово змінює фізичну картину взаємодії робочого органу ущільнюючої машини з ґрунтом основи [1, 2, 10].

Основними властивостями ґрунтів є міцність, щільність, вологість, пористість, кут внутрішнього тертя та ін. З іншого боку машини для ущільнення ґрунтів мають ряд технічних параметрів (маса машини та робочого органу, конструкція котка, характер взаємодії машини з ґрунтом, розміри котка, кількість проходок та ін.) які необхідно враховувати при виборі тієї чи іншої технології ущільнення ґрунту основи. Також, варто зазначити, параметрами режиму взаємодії робочого органу машини з ґрунтом є швидкість руху котка, інтенсивність дії навантаження на ґрунт, амплітуда і частота вібраційних коливань та ін.

Для розв'язання таких задач використовуються традиційні методи: математичне, фізичне, комп'ютерне моделювання, натурні (експериментальні) дослідження, комбіновані методи та ін.

Для розв'язання задач ущільнення ґрунту одним з методів є використання математичних моделей, розрахункові параметри яких наближаються до робочих параметрів реальної системи. Для спрощення розрахунків, доволі часто дію ущільнюваного середовища на коток, замінюють дією сил, нехтуючи при цьому рухом масиву ґрунту; в іншому випадку замінюють ущільнюючу дію котка

статичною або динамічною силою. При цьому використана в першому випадку заміна, призводить до виключення суттєвого впливу масиву ґрунту на роботу ущільнюючої машини, що не відповідає дійсності; а в другому випадку дія ущільнювача враховується дуже наближено і не описує реальну картину зміни контактного тиску під котком. Також, варто зазначити, що для отримання технологічних параметрів процесу ущільнення ґрунту необхідно забезпечити раціональний режим передачі енергії від робочого органу котка до ущільнюваного ґрунту, тобто створити такий характер впливу котка на ґрунт, котрий забезпечить досягнення максимальної якості ущільнення за умови мінімальних енерговитрат. Тому для отримання технологічних параметрів процесу ущільнення необхідно розглядати взаємодію ущільнюваного ґрунту та ущільнюючої машини з максимальним урахуванням фізико-механічних властивостей ґрунту.

Визначення напружень та деформацій ущільнюваного ґрунту розрахунковим шляхом здійснюється з використанням механічної моделі. Одним з методів описання законів пружно-в'язко-пластичної деформації ґрунту є використання реологічних моделей. В механіці ґрунтів найчастіше використовується модель суцільного середовища, яка припускає, що деформації матеріалу відбуваються без порушення суцільності та можуть бути описані безперервними функціями. Модель суцільного середовища можна представити простими моделями: пружним тілом Гука (рис.1, а), в'язким елементом Ньютона (рис.1, б) та пластичним тілом Сен-Венана (рис.1, в), які відповідають трьом фундаментальним властивостям ґрунтів: пружності, в'язкості та пластичності [6].

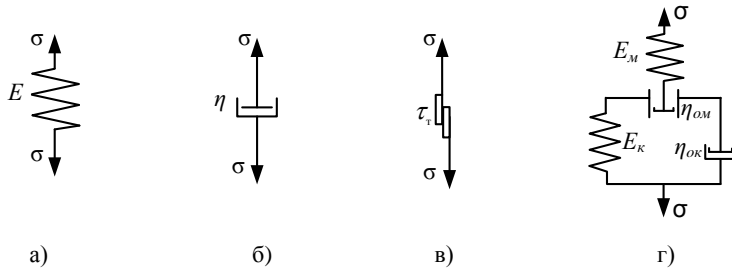


Рис. 1. Реологічні моделі ґрунту:

- а) елемент Гука; б) елемент Ньютона; в) елемент Сен-Венана;  
 г) модель Бюргерса.

Комбінуючи, методом послідовного та паралельного з'єднання цих простих елементів, можна отримати модель ґрунту, яка найбільш точно описує характер деформативних процесів, що відбуваються в ущільнюваному ґрунті.

В якості моделі ущільнюваного ґрунту приймаємо модель Бюргерса (послідовне поєднання елементів Максвелла та Кельвіна-Фойгта) (рис.1, г).

Якщо закон зміни напружено- деформованого стану елемента Кельвіна-Фойгта представити у вигляді [6]:

$$\sigma = E_\kappa \varepsilon + \eta_{OK} \dot{\varepsilon}, \quad (1)$$

а елемента Максвелла у вигляді: 
$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E_M} + \frac{\sigma}{\eta_{0M}}, \quad (2)$$

тоді, опускаючи викладки, запишемо вираз деформації для елемента Кельвіна-Фойгта:

$$\varepsilon_K = e^{-\frac{E_K t}{\eta_{0K}}} \left( \varepsilon_0 + \frac{1}{\eta_{0K}} \int \sigma e^{\frac{E_K t}{\eta_{0K}}} dt \right), \quad (3)$$

відповідно 
$$\dot{\varepsilon}_K = \frac{\sigma}{\eta_{0K}} - \frac{E_K}{\eta_{0K}} e^{-\frac{E_K t}{\eta_{0K}}} \left( \varepsilon_0 + \frac{1}{\eta_{0K}} \int \sigma e^{\frac{E_K t}{\eta_{0K}}} dt \right). \quad (4)$$

Запишемо вираз деформації всієї реологічної моделі:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_M + \dot{\varepsilon}_K = \sigma \frac{\eta_{0K} + \eta_{0M}}{\eta_{0K} \eta_{0M}} + \frac{\dot{\sigma}}{E_M} - \frac{E_K}{\eta_{0K}} e^{-\frac{E_K t}{\eta_{0K}}} \left( \varepsilon_0 + \frac{1}{\eta_{0K}} \int \sigma e^{\frac{E_K t}{\eta_{0K}}} dt \right). \quad (5)$$

Продиференціювавши і замінивши елемент в дужках отримаємо:

$$\dot{\varepsilon} + \frac{\eta_{0K}}{E_K} \ddot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\eta_{0M}} + \dot{\sigma} \frac{\eta_{0K} E_M + \eta_{0M} E_M + \eta_{0M} E_K}{\eta_{0M} E_K E_M} + \ddot{\sigma} \frac{\eta_{0K}}{E_M E_K}, \quad (6)$$

де  $\sigma$  – напруження в ґрунті, Па;  $\varepsilon$  – відносна деформація ґрунту;

$E_M$  – модуль деформації елемента Максвелла, Па;

$E_K$  – модуль деформації елемента Кельвіна-Фойгта, Па;

$\eta_{0M}$  – динамічна в'язкість елемента Максвелла, Па·с;

$\eta_{0K}$  – динамічна в'язкість елемента Кельвіна-Фойгта, Па·с.

З отриманого рівняння запишемо вираз напруження:

$$\ddot{\sigma} = \frac{E_M E_K}{\eta_{0K}} \left( \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_{0K}}{E_K} \ddot{\varepsilon} - \frac{\sigma}{\eta_{0M}} - \dot{\sigma} \frac{\eta_{0K} E_M + \eta_{0M} E_M + \eta_{0M} E_K}{\eta_{0M} E_K E_M} \right). \quad (7)$$

Диференційні рівняння динаміки робочого органу ущільнюючої машини представлено у вигляді двохмасової коливальної системи (рис.2):

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + b(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c(x_1 - x_2) = 0, \quad (8)$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + b(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + c(x_2 - x_1) + F_{zp} = Q \cos \omega t, \quad (9)$$

де  $m_1, m_2$  – відповідно маса корпусу котка (привантажу) і маса вальця, кг;

$x_1, x_2$  – відповідно вертикальне переміщення корпусу котка і вальця, м;

$F_{zp}$  – сила опору ґрунту ущільнюючій дії котка, Н;

$Q \cos \omega t$  – змушуючі вібраційні коливання котка;

$b$  – коефіцієнт опору механічної підвіски котка, Н·с /м;

$c$  – пружність механічної підвіски котка, Н/м.

Запишемо реологічне рівняння напруженого стану шару ґрунту та динаміки машини у зручній для чисельного методу формі:

$$\Delta \dot{\sigma} = \frac{E_M E_K}{\eta_{0K}} \left( \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_{0K}}{E_K} \ddot{\varepsilon} - \frac{\sigma}{\eta_{0M}} - \dot{\sigma} \frac{\eta_{0K} E_M + \eta_{0M} E_M + \eta_{0M} E_K}{\eta_{0M} E_K E_M} \right) \Delta t, \quad (10)$$

$$\dot{\sigma}_i = \dot{\sigma}_{i-1} + \Delta \dot{\sigma}, \quad \sigma_i = \sigma_{i-1} + \dot{\sigma}_i \Delta t, \quad F_{ep,i} = \sigma_i S, \quad (11)$$

$$\Delta v_1 = \frac{1}{m_1} [-b(v_1 - v_2) - c(x_1 - x_2)] \Delta t, \quad (12)$$

$$\Delta v_2 = \frac{1}{m_2} [-b(v_2 - v_1) - c(x_2 - x_1) - F_{ep} + Q \cos \omega t] \Delta t, \quad (13)$$

$$v_{1i} = v_{1i-1} + \Delta v_1, \quad x_{1i} = x_{1i-1} + v_{1i} \Delta t, \quad v_{2i} = v_{2i-1} + \Delta v_2, \quad x_{2i} = x_{2i-1} + v_{2i} \Delta t, \quad (14)$$

$$\varepsilon = \frac{x_1 - x_2}{H}, \quad \dot{\varepsilon} = \frac{\dot{x}_1 - \dot{x}_2}{H}, \quad \ddot{\varepsilon} = \frac{\ddot{x}_1 - \ddot{x}_2}{H}, \quad (15)$$

де  $\Delta \dot{\sigma}$  – прирощення величини швидкості зміни напруги в ґрунті;

$\Delta v_1, \Delta v_2$  – відповідно прирощення швидкості руху корпусу котка і вальця;

$\varepsilon, \dot{\varepsilon}, \ddot{\varepsilon}$  – відповідно відносна деформація, швидкість відносної деформації та прискорення відносної деформації шарів ґрунту.

Для розв’язання вищенаведених рівнянь руху створено програму розрахунку основних параметрів системи на ЕОМ в середовищі Mathcad. Моделювання динаміки системи проведено за таких початкових умов:  $\eta_{0K}=4 \cdot 10^4$  Па·с;  $\eta_{0M}=4 \cdot 10^4$  Па·с;  $E_K=7 \cdot 10^5$  Па;  $E_M=16 \cdot 10^6$  Па [3].

Продуктивність котка можна розрахувати за формулою [7]:

$$P_m = \frac{1000 \cdot (B - b) h v k_e}{z}, \quad (16)$$

де  $B$  – ширина смуги ущільнення, м;  $b$  – ширина перекриття смуг, м;

$h$  – товщина шару ущільнюваного ґрунту, м;  $v$  – швидкість руху котка, км/год;

$z$  – кількість проходок котка по одній полосі;  $k_e$  – коефіцієнт використання машини в часі.

З курсу опору матеріалів відомо, що робота внутрішніх сил, що припадає на елементарний об’єм в умовах одномірної зміни напружено-деформованого стану дорівнює:

$$A = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon, \quad (17)$$

де  $\sigma$  та  $\varepsilon$  – напруження та відносна деформація шару ґрунту в умовах контакту з котком.

З іншого боку елементарна робота сил тиску котка на ґрунт:

$$A = \int_v P_{маш} dh, \quad (18)$$

де  $P_{маш}$  – тиск котка на ґрунт в умовах ущільнення, Н;

$dh$  – деформація елементарного шару ґрунту, м.

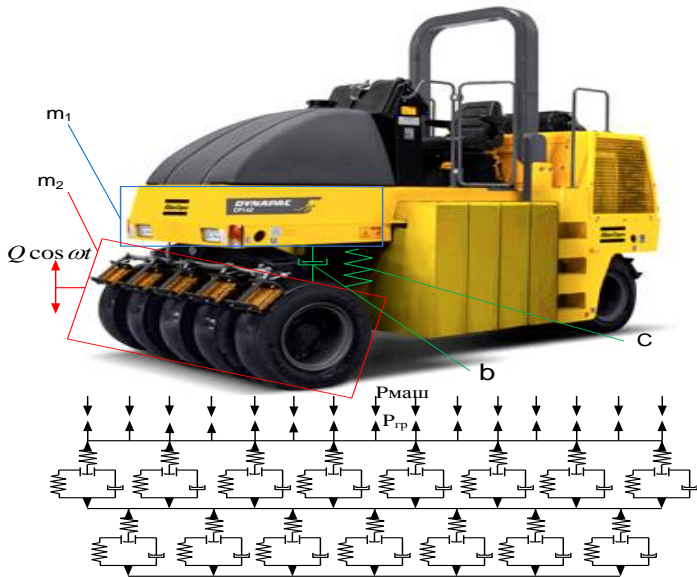


Рис. 2. Модель взаємодії котка з ґрунтом основи

Сумісно розв'язуючи рівняння (7)-(15) та (17) і (18), можемо знайти деформацію шару ґрунту, що виникає в умовах дії заданого тиску на ґрунт, що має визначені характеристики пружності та в'язкості. Далі, знаючи деформацію, що утворюється за одну проходку а також необхідний коефіцієнт ущільнення, доволі легко визначити кількість проходок котка  $z$ .

Наступним етапом досліджень є визначення швидкості руху котка виходячи з властивостей ґрунту. З курсу реології [6] відомо, що напружено-деформований стан середовища змінюється в залежності від швидкості прикладання зовнішнього навантаження. Це явище пов'язане з властивостями самого середовища, зокрема з такими його характеристиками як період релаксації та ретардації, тобто час, протягом якого напруження в середовищі зменшується в  $e$  – разів (2,71) а також час пружної післядії. Виходячи з цього, запишемо вираз для швидкості руху котка:

$$V_k \leq \frac{S}{T_{\text{rel}}}, \quad (19)$$

де  $S$  – довжина полоси контакту котка з ґрунтом основи, м;  $T_{\text{rel}}$  – період релаксації напруг, що виникають в ґрунті під час ущільнення, с. В результаті теоретичних досліджень встановлено, що період релаксації напружень ґрунту в умовах ущільнення складає від 0,3 с до 10 с. Таким чином, середня швидкість руху котка не повинна перевищувати 15 км/год.

При дії на ґрунт зовнішніх навантажень в ньому виникають пружні та пластичні деформації. Величина пружних деформацій свідчить про ступінь пружності ґрунту, а величина пластичних деформацій, головним чином про ступінь ущільненості. Вивчення закономірностей утворення напружено-деформованого стану ґрунту та величини пластичних деформацій, що виникають при цьому має надзвичайно важливе значення для оцінки несучої здатності ґрунтової основи. Ущільнення ґрунту в будівництві ведуть масивом, в якому ущільнений ґрунт оточений з боків ґрунтовою відсипкою. Ґрунт укладають і ущільнюють з дотриманням технічних вимог, що дозволяють одержати необхідну щільність, найменшу фільтраційну здатність і виключити можливість наступних усадок. Крім цього, треба приділити уваги вибору виду і стану ґрунту, який використовують для відсипки, при зведенні споруд.

Ґрунт, який використовують для відсипки, зволожують або висушують до оптимальної вологості. Це дозволяє підвищити ступінь ущільнення і зменшити сили зчеплення, що позитивно впливає на виконання процесу.

Поряд з теоретичними дослідженнями важливу роль відіграють експериментальні дослідження, які дають можливість оцінити характер протікання фізичних явищ в умовах виконання технологічного процесу ущільнення ґрунту, і, таким чином, уточнити математичну модель процесу ущільнення ґрунту котками.

На рисунку 3 показано експериментальний графік залежності зміни відносної деформації ґрунту від тиску за умов ущільнення котком динамічної дії. Експериментальну криву (рис.3) було апроксимовано методом поліноміальної регресії. Також було проведено Фур'є-аналіз отриманих даних [3] (рис. 4).

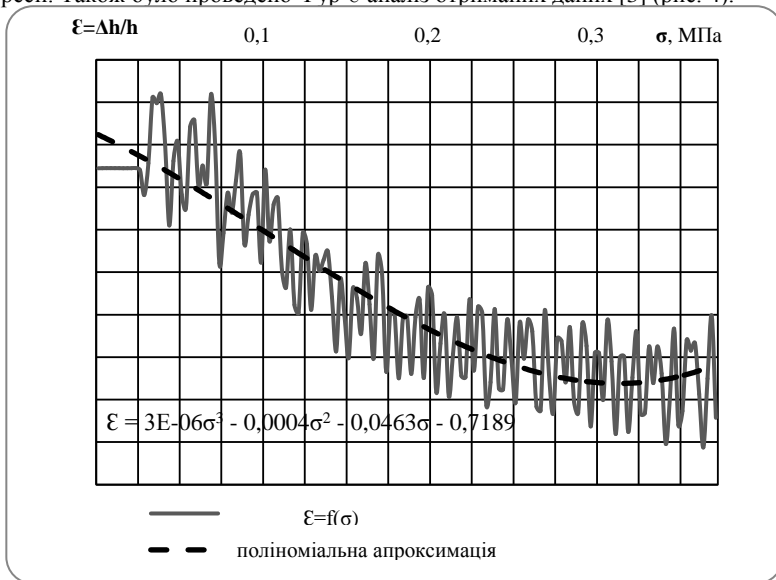


Рис. 3. Діаграма зміни напружень та деформацій в ґрунті

Проведені дослідження дають можливість знаходження раціональних технологічних параметрів а також розробки технологічних методів та режимів ущільнення ґрунтів котками динамічної дії. Напруження в ґрунті в умовах ущільнення можна представити у вигляді гармонічного спектру (16).

$$\sigma(t) = \sum_{n=1}^N (a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t)), \quad (16)$$

де  $a_n, b_n$  - коефіцієнти ряду, що обчислюються за умов апроксимації експериментальних осцилограм напруження ґрунту.

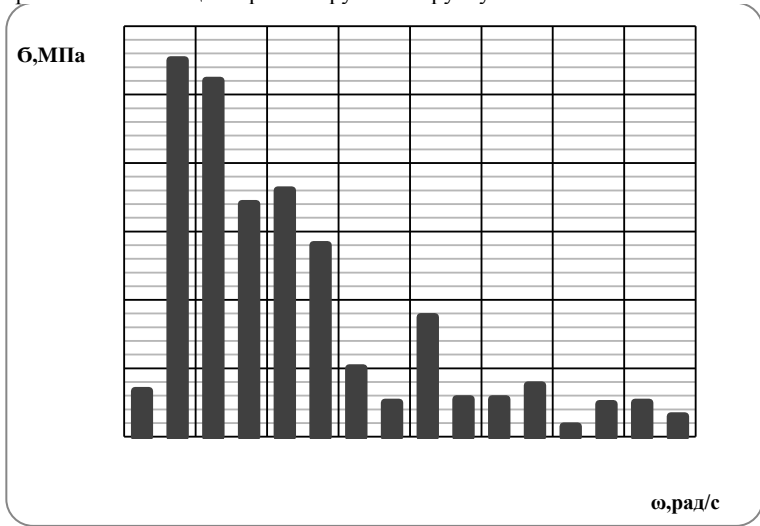


Рис. 4. Фур'є-аналіз напружень в ґрунті за умов ущільнення.

Експериментальні дослідження дають можливість отримати достовірні характеристики ґрунту, що ущільнюється, і, таким чином, вносячи ці дані в математичну модель (5) – (15) можемо отримати достатньо точну модель процесу ущільнення. Таким чином, отримуємо необхідні технологічні параметри процесу ущільнення ґрунту виходячи з його фізико-механічних властивостей.

Зв'язні й грудкуваті ґрунти ущільнюють кулачковими котками, що створюють тиск, переважаючий межі міцності ґрунту а піщані й глинисті – котками на пневмоколісному ходу.

Кулачковими і пневмоколісними котками ґрунт ущільнюють послідовно замкнутими проходками котка по всій площі насипу з перекриттям кожної попередньої проходки на 0,15...0,25 м (рис. 5). По закінченні укочування всієї площадки процес багаторазово повторюють поки не буде досягнута проектна щільність ґрунту.

Зв'язні ґрунти і піщано-гравелісті суміші при товщині шару, що відсипається, до 15 см ущільнюють котками з гладкими металевими вальцями. Такі котки



ефективно використовують при засипанні верхньої частини пазух у стислих умовах.

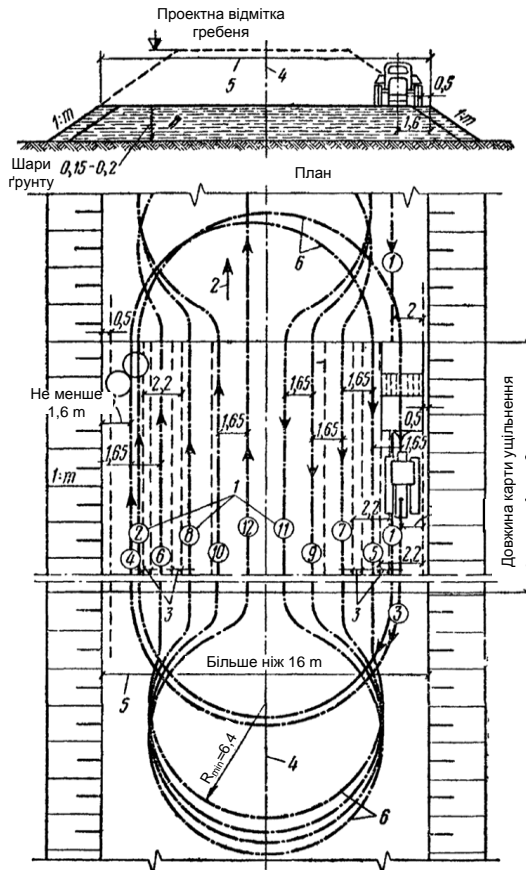


Рис. 5. Схема ущільнення ґрунту котками

Збільшення продуктивності ущільнюючих машин можливо за рахунок збільшення швидкості руху, збільшення товщини шару ґрунту, що ущільнюється та за рахунок збільшення ширини полоси ущільнення.

Котки з гладкими металевими вальцями забезпечують ущільнення ґрунту лише за рахунок тиску і мають явні недоліки особливо в умовах ущільнення насипів доріг. Котки статичної дії не можуть продуктивно працювати в умовах глибини шару більше 10 см, оскільки їхня дія залежить від лінійних навантажень, вплив яких обмежується верхньою частиною шару, що ущільнюється, без

глибокого проникнення в ущільнюваний матеріал. Тому, котки такого типу не забезпечують рівномірного ущільнення шару ґрунту на глибину.

Вібраційні котки призначені в основному для ущільнення кам'янистих та гранульованих ґрунтів, котрі завдяки експлуатаційним характеристикам віброкатків можуть ущільнюватися глибокими шарами, в деяких випадках до 1 м. Внаслідок дії вібрації в піщаних ґрунтах порушується зв'язок між зернами та відбувається більш щільна упаковка структури ґрунту. Ефективність віброущільнення залежить від амплітуди, частоти та тривалості ущільнення. Кожному розміру ґрунтових часточок відповідає певна оптимальна частота коливань. Чим дрібніші часточки ґрунту тим більшою повинна бути частота вібраційного впливу. Ґрунт складається з часточок різних розмірів, тому, доцільно застосовувати різночастотне або полічастотне віброущільнення [3]. Частота коливань пов'язана з питомим статичним тиском вібратора: зі зменшенням тиску частота вібрації повинна зростати і може варіюватись в межах  $1200 \dots 2000 \text{ хв}^{-1}$ . Для забезпечення ефективної роботи віброкатка важливе значення має його швидкість, яка повинна бути в межах 3-5 км/год.

Кулачкові котки придатні для ущільнення всіх ґрунтів, але особливо ефективні за умов ущільнення зв'язних ґрунтів. Контакт з ґрунтом відбувається на малій площі, що забезпечує великий питомий тиск. В умовах ущільнення такими котками щільність ґрунту зростає. Величина заглиблення кулачків зменшується і цим досягається рівномірне ущільнення по товщині. Продуктивність самохідних кулачкових котків в 2-3 рази вища ніж у причіпних внаслідок більшої швидкості ущільнення матеріалу. Параметри кулачкових котків, що використовуються на будівництві наступні: маса машин до 30 т; довжина кулачків до 0,3 м; опорна поверхня кулачка до  $50 \text{ см}^2$ ; товщина шару, що ущільнюється до 0,3 м.

Решітчасті котки використовуються в основному для ущільнення глинистих та крупнообломочних скелястих ґрунтів. Швидкість пересування машин до 20 км/год, товщина шару ущільнення 0,3-0,75 м. При діаметрі вальця решітчастих котків 2,5-2,6 м, продуктивність досягає 2,5 – 3 тис.  $\text{м}^3/\text{зміну}$ .

Ефективність застосування того чи іншого методу та режиму ущільнення ґрунту залежить від механічного складу ґрунту, вологості ґрунту, тривалості вібрації. Машини для ущільнення ґрунту вибирають з врахуванням лінійних розмірів, площі і форми поверхонь, що потребують ущільнення, обсягів і інтенсивності робіт, виду ґрунту а також економічних показників.

#### **Висновки:**

1. Огляд існуючих методів ущільнення ґрунту виявив доцільність дослідження поведінки системи з метою встановлення технологічних параметрів процесу ущільнення.
2. Проведено аналіз математичної моделі взаємодії котка з ґрунтом основи з ціллю визначення технологічних параметрів процесу ущільнення ґрунтів.
3. Визначено основні технологічні параметри процесу ущільнення ґрунту котками – товщина шару ґрунту, що ущільнюється, кількість проходок котка а також швидкість руху котка.
4. Запропоновано методологію теоретико-експериментальних досліджень взаємодії котка з ґрунтом основи з метою уточнення математичної моделі.

5. Запропоновано методологію експериментальних досліджень, що ґрунтуються на визначенні напружено-деформованого стану ґрунту а також на проведеному Фур'є-аналізу експериментальних даних.

#### **Список літератури:**

1. Avalor, D.L. (2007). "Trials and validation of deep compaction using the "square" impact roller". Symposium - Advances in Earthworks, Australian Geomechanics Society, Sydney, 6pp.
2. Brendan Scott, Mark Jaksa, Yien Lik Kuo. (2012). Use of proctor compaction testing for deep fill construction using impact rollers. International Conference on Ground Improvement and Ground Control (ICGI 2012), 30 Oct. – 2 Nov. 2012, University of Wollongong, Australia.
3. Басараб В.А. Дослідження полічастотного режиму коливаний робочого органу електромагнітної ударно-вібраційної установки / В.А. Басараб // Управління розвитком складних систем № 34. К.: КНУБА, 2018. – С. 182 - 187.
4. Белоногов Л.Б. Современные методы уплотнения грунтов. Выбор и расчет оборудования: учеб.-метод. пособие / Л.Б. Белоногов, Л.В. Янковский. – Пермь: изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. -136 с.
5. Неклюдов М.К. Механизация уплотнения грунтов. – 2-е изд. доп. и перер. / Неклюдов М.К. – М.: Стройиздат, 1985. – 168 с.
6. Рейнер Маркус. Реология / Маркус Рейнер. – М.: Наука, 1965. – 223 с.
7. Сукач М.К. Будівельні машини і обладнання / М.К. Сукач – К.: Ліра-К, 2016. – 408 с.
8. Терновий В.І. Ущільнення ґрунтів у будівництві / В.І. Терновий, І.М. Уманець, Л.С. Саушева, О.С. Молодід – К.: "ЦП КОМПРИНТ", 2015. – 136 с.
9. Хархута Н.Я. Машины для уплотнения грунтов / Н.Я. Хархута – Л.: Машиностроение, 1973. – 176 с.
10. Хмара Л.А., Шатов С.В., Карпушин С.О. Удосконалення конструкції самохідних котків / Л.А. Хмара, С.В. Шатов, С.О. Карпушин // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. №97. 2017. - С. 105-111.

#### **References**

1. Avalor, D.L. (2007). "Trials and validation of deep compaction using the "square" impact roller". Symposium - Advances in Earthworks, Australian Geomechanics Society, Sydney, 6pp.
2. Brendan Scott, Mark Jaksa, Yien Lik Kuo. (2012). Use of proctor compaction testing for deep fill construction using impact rollers. International Conference on Ground Improvement and Ground Control (ICGI 2012), 30 Oct. – 2 Nov. 2012, University of Wollongong, Australia.
3. Basarab, Volodymyr (2018). Investigation of the polyfrequency mode of oscillation of the electromagnetic shock-vibration unit. *Management of Development of Complex Systems*, (34), 182-187.
4. Belonogov, L.B. (2012). Modern soil compaction methods. Perm, Russia: perm University, 136.
5. Neklyudov, M.K. (1995). Mechanization of soil compaction. Moscow, Russia: Stroyizdat, 168.
6. Reyner Markus. (1965). Rheology. Moscow, Russia: Nauka, 223.

7. Sukach M.K. (2016). Construction machinery and equipment. Kyiv: Lira-K, 408.
8. Ternoviy, V.I., Umanets, I.M., Sausheva, L.S., Molodid, O.S. (2015). Soil compaction in construction. Kyiv: "TsP KOMPRINT", 136.
9. Harhuta, N.Ya. (1973). Machines for soil compaction. Leningrad: Mashinostroenie, 176.
10. Hmara, L.A., Shatov, S.V., Karpushin, S.O. (2017). Improving the design of self-propelled rollers. *Construction. Material science. Mechanical Engineering*, (97), 105-111.

### ***V.A. Basarab***

#### ***Определение технологических параметров процесса уплотнения грунта***

*Статья посвящена определению технологических параметров уплотнения грунтов катками с учетом их свойств в условиях строительства. Уплотнение грунта происходит за счет определенных силовых нагрузок на грунт. Подчеркнуто актуальность процесса уплотнения грунта, что в конечном итоге, определяет качество строительной продукции в целом. Приведены основные физико-механические свойства грунта, а также технологические параметры процесса уплотнения. Проведен анализ дискретной математической модели взаимодействия катка с грунтом основания с целью определения технологических параметров процесса уплотнения грунта в условиях строительного производства. Для описания свойств грунта использована реологическая модель. Составлены дифференциальные уравнения взаимодействия катка с грунтом основания. Для решения дифференциальных уравнений предложен численный метод расчета. Определены основные технологические параметры процесса уплотнения грунта катками - толщина слоя уплотняемого грунта, количество проходов катка а также скорость движения катка. Предложена методология теоретико-экспериментальных исследований взаимодействия катка с грунтом основания с целью уточнения математической модели и нахождения технологических параметров процесса уплотнения. Экспериментальные методы исследований основываются на определении напряженно-деформированного состояния грунта, а также на проведении Фурье-анализа экспериментальных данных. Фурье-анализ экспериментальных данных дает возможность проанализировать качественный энергетический спектр взаимодействия катка с грунтом и определить рациональные амплитудно-частотные характеристики процесса уплотнения. Экспериментальные исследования дают возможность получить такие реологические свойства грунта как упругость, вязкость, коэффициент неупругого сопротивления и др. Приведены основные рекомендации по выбору методов уплотнения в зависимости от вида грунта.*

***Ключевые слова:* уплотнение грунта, технологические параметры процесса уплотнения, строительное производство, реологическая модель, Фурье-анализ экспериментальных данных.**

### ***V. Basarab***

#### ***Determination of technological parameters of soil compacting process***

*The article is devoted to determine the technological parameters of soil compaction by rollers according to soil properties in construction. The compaction of the soil occurs*

*due to certain force loads on the soil. Nowadays, there are enough methods to determine the technological parameters of soil compaction process, however, there are few research methods that consider the system of soil-machine-technological parameters. The urgency of the soil compaction process, which ultimately determines the quality of construction products, was emphasized. The basic physical and mechanical properties of soil and technological parameters of the compaction process were given. Analysis of discrete mathematical model of interaction between roller and soil was carried out in order to determine the technological parameters of soil compaction process in the field of construction technologies. A rheological model to describe the soil properties was used. The differential equations of the interaction between roller and soil have been made. A numerical calculation method to solve the differential equations has been proposed. The basic technological parameters of soil compaction process by rollers have been determined - the thickness of soil layer to be compacted, the number of the roller passes, and the speed of the roller movement. The methodology of theoretical and experimental researches of interaction between roller and soil has been proposed in order to clarify the mathematical model and to find the technological parameters of the compaction process. Experimental research methods are based on the determination of the stress-strain state of soil and on the Fourier analysis of the experimental data. Fourier analysis of the experimental data makes it possible to analyze the qualitative energy spectrum of the interaction between roller and soil to determine the rational amplitude-frequency characteristics of the compaction process. Experimental studies allow obtaining such rheological properties of soil as elasticity, viscosity, coefficient of elastic resistance, etc. The main recommendations for the choice of compaction method depending on the type of soil have been proposed.*

**Key words:** *soil compacting, technological parameters of soil compaction, construction technologies, rheological model, Fourier analysis of the experimental data.*

### **Посилання на статтю**

**АРА:** Basarab, V. (2020). Determination of technological parameters of soil compacting process. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn*, 45, 3 –15

**ДСТУ:** Басараб В.А. Визначення технологічних параметрів процесу ущільнення ґрунту [Текст] / В.А. Басараб // Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. – 2020. – № 45. – С. 3 –15.