

І.М. Уманець,

канд. техн. наук, доцент

В.А. Басараб,

канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0003-2888-7398

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

ТЕХНОЛОГІЧНІ ЧИННИКИ ПРОЦЕСУ УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТУ В СКЛАДНИХ УМОВАХ БУДІВНИЦТВА

Стаття присвячена технології ущільнення ґрунтів механічним способом в складних умовах будівельного майданчика. Ущільнення ґрунту відбувається за рахунок певних силових навантажень на ґрунт. Підкреслено актуальність процесу ущільнення ґрунту, що в кінцевому результаті, визначає якість будівельної продукції в цілому. Наведено основні фізико-механічні властивості ґрунту а також технологічні чинники процесу ущільнення. Акцентовано увагу на тому, що вибір технології ущільнення ґрунту в складних умовах базується на розумінні того факту, що необхідно розглядати процес ущільнення як комплексну модель взаємодії ущільнюючої машини з ґрунтом основи. Зазначено, що вибір режиму статичної або динамічної дії на ґрунт основи залежить від правильного вибору математичної моделі системи взаємодії машина-ґрунт. Проведено огляд існуючих методів ущільнення ґрунту та обґрунтовано доцільність дослідження методів ущільнення ґрунту в складних умовах будівництва з метою підбору оптимального комплексу ущільнюючого обладнання. Проведено аналіз існуючих технологій ущільнення ґрунту з ціллю визначення оптимальних технологічних параметрів процесу ущільнення ґрунтів в складних умовах будівництва. Наведено технологічну схему виконання процесу ущільнення ґрунту в складних умовах. Описано технологію виконання робіт з урахуванням властивостей ґрунту, методу ущільнення, параметрів ущільнюючого обладнання а також умов виконання робіт. Запропоновано основні технологічні параметри процесу ущільнення ґрунту – товщина шару ґрунту, що ущільнюється, кількість проходок ущільнюючої машини а також швидкість її руху. Запропоновано теоретико-експериментальний метод знаходження оптимальних параметрів взаємодії ущільнюючої машини з ґрунтом основи з метою встановлення оптимальних меж варіюючих параметрів технологічного процесу ущільнення ґрунту в складних умовах будівництва. Проведено аналіз конструктивних та технологічних параметрів ущільнюючих машин з метою ефективного використання в умовах будівельного виробництва. Наведено основні рекомендації по вибору методу ущільнення та комплексу ущільнюючого устаткування в залежності від виду ґрунту та умов виконання робіт.

Ключові слова: *технологія ущільнення ґрунту, технологічний процес, технологічні параметри процесу ущільнення ґрунту.*

Вступ. Ущільнення ґрунтів в складних умовах визначається технологією специфікою будівельних робіт, а саме обмеженістю фронту робіт, особливостями геометричних елементів земляної споруди, що ускладнює, а іноді і взагалі виключає можливість використання звичайних землерийно-транспортних та

ущільнюючих машин (самоскиди і бульдозери для зворотної засипки, бульдозери і грейдери для пошарового розрівнювання ґрунту, катки і вібраційні машини для ущільнення ґрунту) [4, 5, 6, 7, 11, 12]. Із загального обсягу ґрунту, що підлягає ущільненню в обмежених місцях, більша частина припадає на промислове і цивільне будівництво. Великий обсяг ґрунту підлягає ущільненню в пазуха х фундаментів, трубопроводів, колекторів, оглядових колодязів, основ під підлоги всередині будівель, в перетинах різного роду комунікацій та ін. Недостатнє ущільнення ґрунтів в цих місцях призводить до руйнування конструкцій будівельних споруд.

Актуальність. В умовах будівництва недостатня щільність ґрунту призводить до надмірних витрат коштів та праці через невірний вибраний спосіб ущільнення. Крім того, ущільнення ґрунту доволі часто пов'язано з наявністю в котлованах і траншеях різного роду труб, підземних комунікацій і збірних елементів, що не дозволяє на певних ділянках засипки використовувати традиційні ущільнюючі машини, які розвивають достатній зусилля, необхідні для досягнення необхідної щільності. Також, слід зазначити, важливим аспектом процесу ущільнення у відповідності з технологічними умовами є вибір того чи іншого засобу механізації, що використовується для ущільнення ґрунту [1, 2, 3, 8, 9, 10]. На сьогоднішній день існує достатньо велике розмаїття машин та обладнання для ущільнення ґрунту, проте питання оптимального вибору механізованих комплексів, які дають можливість за умов мінімізації фінансових ресурсів та часу отримати максимальну продуктивність в складних умовах будівельного майданчика, залишається актуальним.

Постановка проблеми. При розрахунках та виборі параметрів ущільнюючих машин в складних умовах будівництва необхідними умовами точного їх визначення є аргументований вибір моделі ущільнюваного середовища, врахування властивостей ґрунту, технічних особливостей механічного обладнання, коректного вибору технології виконання робіт та інші технологічні чинники.

Метою даної роботи є розробка теоретико-експериментальної методики оптимального вибору механізованих комплексів для ущільнення ґрунтів в складних умовах будівництва.

Основний матеріал. В умовах виконання земляних робіт на будівництві виникає необхідність одержати ґрунти з заданими фізико-механічними властивостями. Для створення основи споруди з достатньою несучою здатністю, або влаштування якісного насипу ґрунти доводять до проектної щільності. Із збільшенням щільності ґрунту зростає його міцність, водонепроникність, опір розмиванню, збільшується статична стійкість споруди.

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.

Деформації ґрунтів під навантаженням супроводжуються складними процесами: стисненням твердих часток, стисненням води та повітря, що знаходяться в порах ґрунту, руйнуванням зв'язків між частками й їхнім взаємним зміщенням, зміною товщини плівок води та віджиманням вільної води з пор ґрунту.

В процесі ущільнення ґрунту виникають пружні та пластичні деформації. Пружні деформації є результатом навантажень, що не перевищують структурну міцність ґрунтів та характеризуються здатністю ґрунту повертатися в початковий стан після зняття навантажень. Пластичні деформації руйнують скелет ґрунту, порушуючи зв'язки та переміщуючи частки одну відносно другої. Водночас об'ємні пластичні деформації ущільнюють ґрунт шляхом зміни об'єму внутрішніх пор, а зсувні пластичні деформації – шляхом зміни його первинної форми й аж до руйнування.

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 машин з ґрунтом основи [1, 2, 8, 9, 10]. Вибір режиму статичної або динамічної дії на ґрунт основи залежить від правильного вибору математичної моделі системи взаємодії машина-ґрунт [1, 8, 9, 10].

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.

Для описання математичної моделі взаємодії ущільнюючої машини з ґрунтом основи існує декілька основних методів серед яких модель дискретного середовища [1, 8, 9, 10], модель з розподіленими параметрами, метод скінченних елементів та інші.

В дискретній системі основою для представлення параметрів ґрунту є реологічні моделі, що дозволяють достатньо точно описати поведінку системи машина-ґрунт і отримати основні технологічні параметри процесу ущільнення. Система з розподіленими параметрами описує параметри напружено-деформованого стану ґрунту у вигляді хвильового рівняння. У випадку врахування пружно-в'язких властивостей ґрунту рівняння запишемо наступним чином:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \beta \frac{\partial^3 u}{x^2}, \quad (1)$$

де $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ – швидкість розповсюдження хвиль деформації в шарах суміші, м/с;

$u(x, t)$ – переміщення елементарного шару ґрунту в точці x в момент t відносно початкового положення.

Загальне рішення хвильового рівняння має вигляд [9,10]:

$$u(x, t) = x_{1i-\theta}(t)e^{-\zeta x} + x_{1i-\nu}(t)e^{-\zeta(2H-x)}. \quad (2)$$

Закон деформування пружного середовища (грунту) за гіпотезою Кельвіна – Фойгта запишемо у вигляді:

$$\sigma = E\varepsilon + k_0 \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (3)$$

де σ – напруження, Па; $\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x}$ – відносна деформація; E – модуль пружності, Па; k_0 – динамічна в'язкість, Па·с; $\beta = \frac{k_0}{\rho}$ – кінематична в'язкість м²/с.

Також, якщо представити масив ґрунту у вигляді тривимірної скінченноелементної сітки і задавши коректні параметри ґрунту, машини і технології виконання робіт, то отримаємо модель, що дає можливість визначити параметри системи в динаміці, тобто з урахуванням зміни властивостей ґрунту, режиму роботи машини та ін.

Як було зазначено в роботі [1, 9, 10] одним з дієвих підходів до точної оцінки технологічних параметрів процесу ущільнення ґрунту є експериментальний метод дослідження. Використання дослідно-експериментального обладнання в умовах натурних випробувань дає можливість отримати реальні параметри машини та ґрунту в умовах ущільнення, і, таким чином уточнити теоретичну модель.

В якості прикладу на рис. 1 наведено експериментальні графіки залежності переміщення шарів ґрунту та кута зміни фаз між напруженням та деформацією від глибини розташування шарів ґрунту основи.

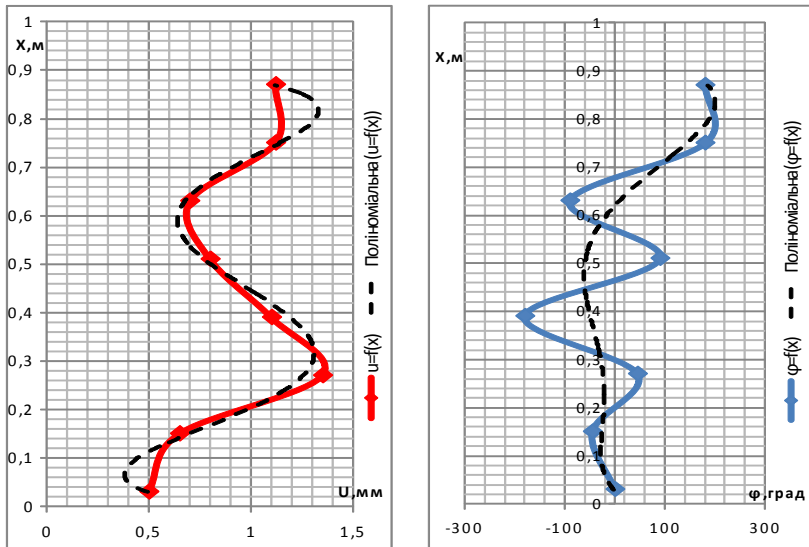


Рис. 1. Експериментальні графіки залежності переміщення шарів ґрунту та кута зміни фаз між напруженням та деформацією від глибини розташування шарів ґрунту основи

В основі технології укладання і ущільнення зв'язкових ґрунтів лежить розбивка насипу на карти – ділянки невеликої довжини, на яких послідовно

проводять операції з розвантаження ґрунту, його розрівнювання та ущільнення. Число ділянок, що одночасно використовуються для укладання ґрунту, залежить від обсягу робіт, наявності обладнання, сезону виконання робіт і може змінюватися в межах від 4 до 2. У літню пору найбільшої продуктивності можна досягти, якщо роботи вести на 4-х ділянках. У зимовий час число ділянок слід приймати не більше 2-х. Розміри карт визначають конкретними умовами проекту споруди, застосовуваними механізмами та умовами виконання робіт, однак їх довжина повинна бути не менше 200 м.

Укладання та ущільнення ґрунту виконують у процесі планування, зведення різних насипів, зворотної засипки траншей та пазах фундаментів, улаштування основ під підлоги тощо. Завдяки ущільненню ґрунтів досягається збільшення несучої здатності, міцності, зниження водопроникності, зменшення його стиснення. Збільшенню щільності ґрунту під час ущільнення сприяє взаємне переміщення твердої та рідкої фаз і повітря, що міститься в порах ґрунту. Однак щільність в міру ущільнення ґрунту зростає до певної межі, після чого подальше ущільнення не впливає на несучу здатність ґрунту. Так, коефіцієнт ущільнення ґрунту (відношення проектної щільності ґрунту до максимальної), рівний 0,95...0,98, є нормативним під час зведення відповідальних споруд.

ґрунти в насипах ущільнюють шарами однакової товщини. Для цього відсипаний ґрунт вирівнюють бульдозерами чи грейдерами. Товщину шарів ґрунту, що підлягають розрівнюванню визначають залежно від умов виконання робіт, виду ґрунту та можливості застосування ущільнювальних машин. Потрібного ступеня ущільнення ґрунту з найменшими витратами досягають, коли вологість ґрунту оптимальна, тому сухі ґрунти необхідно зволожувати, а перезволожені – осушувати. Перед розробленням або ущільненням ґрунт зволожують поливними машинами або вручну гумовими шлангами, підключеними до водопроводу.

Укладання ґрунту та його ущільнення здійснюють по захватках (картах), розміри яких мають забезпечити потрібний фронт робіт та не допустити висихання підготовленого для ущільнення ґрунту. Наприклад, для влаштування насипів із ґрунтів, доставлених автосамоскидами, майданчик розбивають на три карти: на першій розвантажують ґрунт, на другій – розрівнюють його, на третій – ущільнюють.

Ущільнюють ґрунт укочуванням, трамбуванням та вібруванням. Зв'язні та грудкуваті ґрунти ущільнюють кулачковими котками, які передають на ґрунт тиск, що значно перевищує границю його міцності. Такими машинами масою до 5 т ущільнюють шар ґрунту 10...20 см завтовшки за 8...18 проходів котка по одному сліду, а важкими (масою 25...30 т) – шар 50...65 см завтовшки за 4... 10 проходів по одному сліду.

Котками па пневмоколісному ходу (причіпними та самохідними) ущільнюють піщані та глинисті ґрунти. Через більшу тривалість дії навантаження від стиснення шин забезпечується добра якість ущільнення. Котками середньої маси (до 10 т) ущільнюють шари 10...25 см завтовшки за 2... 10 проходів котка по одному сліду, котками більшої маси (до 45 т) – шар 25...50 см завтовшки за таку саму кількість проходів котка по одному сліду.

Кулачковими котками та котками на пневмоколісному ходу ґрунт ущільнюють послідовними замкненими проходами котка по всій площі насипу з перекриттям кожного проходу на 0,2...0,3 м. Важливо, щоб перший прохід котка забезпечив

потрібну рівність поверхні шару ґрунту, яка зберігається при наступних проходах. Тому перші проходи здійснюють на 1-2-й швидкості трактора, а інші – на 3-4-й.

Котки з гладкими металевими вальцями придатні для ущільнення зв'язних ґрунтів шаром до 15 см. Такими котками доцільно виконувати ущільнення, коли верхній шар насипу є основою під фундаменти чи під'їзні шляхи, а також при засипанні верхньої частини пазах у стиснених умовах. Нижні шари пазухи 15...20 см завтовшки навколо фундаменту ущільнюють пневматичними та електричними трамбівками.

Трамбувальними плитами масою 2...7 т, підвішеними на стрілі кранів чи екскаваторів, ущільнюють піщані та глинисті ґрунти, якщо товщина відсипаного шару 0,4...1 м і кількість ударів 1...5. Недоліком цього способу є підвищене зношування крана чи екскаватора.

Вібраційними котками ущільнюють піщані ґрунти шарами 0,4...0,5 м при збуджувальній силі 180...280 кН. Для досягнення потрібної щільності кількість проходів по одному сліду приймають від 2 до 6. Ґрунт ущільнюють за круговою схемою або човниковим способом.

Заздалегідь насичені водою піски ущільнюють глибинними вібраторами, змонтованими на рамі у вигляді пакетів та підвішеними на стрілі крана.

Зворотне засипання пазах між стінками підвалу та укосами котловану виконують після влаштування перекриття над підвалом та гідроізоляції стін. Для цього використовують залишки ґрунту, утворені під час риття котловану, переміщуючи їх бульдозером. Засипання здійснюють шарами 20...30 см з наступним ущільненням пневматичними чи електричними трамбівками, а також підвісними плитами.

Ґрунт пазах глибоких підвальних частин промислових споруд засипають та ущільнюють одноразово з двох боків споруди після зведення стін. Спочатку ґрунт подають та рівняють бульдозерами з одного боку цієї споруди (рис. 2, а), а потім, під час ущільнення цього шару ґрунту, подають та рівняють з іншого боку споруди.

Зворотне засипання котловану при складних у плані фундаментах виконують сразу після зведення підземної частини споруди (зняття опалубки та гідроізоляції поверхонь підземних конструкцій), до початку робіт по наземній частині. При цьому створюються найбільш сприятливі умови для механізації робіт та застосування великогабаритних машин.

Ґрунт подають екскаватором, оснащеним грейфером, а рівняють мінібульдозером. Ущільнюють ґрунт концентрованими смугами за допомогою підвісних плит у межах робочої картини, визначеної підземними конструкціями (рис. 2, б).

Ґрунт ущільнюють також віброплитами або віброзанурювачами. Насамперед виконують роботи в межах ділянки зі зниженими позначками, щоб отримати загальний рівень, а потім проводять роботи по всьому котловану.

Зворотне засипання траншей здійснюють після перевірки правильності укладання трубопроводів. Траншеї засипають у два прийоми спочатку присипають трубопроводи вручну на висоту 0,2 м, потім засипають бульдозером.

Кріплення видаляють в міру засипання. Одночасно можна знімати по вертикалі не більше трьох дошок. У сипких ґрунтах кріплення розбирають по одній дошці, переставляючи розпірки. Якщо видалення кріплень викликає небезпеку (в пливунах, поблизу фундаментів існуючих споруд тощо), їх залишають у ґрунті або розбирають частково.

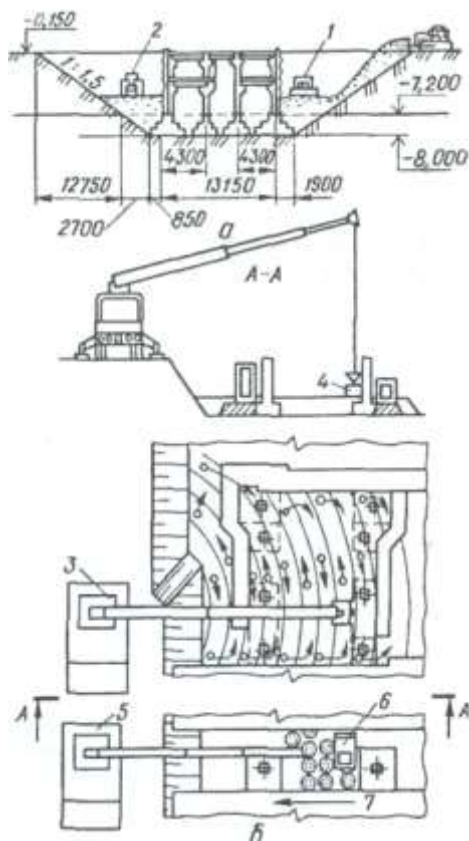


Рис. 2. Зворотнє засипання та ущільнення ґрунту:

- а – засипання пазух котловану;
- б – ущільнення ґрунту підвісною плитою;
- 1 – бульдозер; 2 – машина для ущільнення ґрунту; 3 – кран; 4 – підвісна плита; 5 – екскаватор з грейферним ковшем; 6 – мінібульдозер; 7 – напрямок відсипання

Магістральні трубопроводи та фундаменти засипають відповідно до будівельних норм і правил. Ґрунт завозять автосамоскидами з безпосередньою подачею його в траншеї або використовують найближчі відвали, з яких ґрунт переміщують бульдозерами або іншою технікою.

Зворотнє засипання траншеї з пошаровим ущільненням має кілька відмінностей, які дозволять забезпечити працездатність трубопроводів і швидкий доступ до регулювальної арматури. Перед укладанням комунікаційних шляхів дно траншеї засипають щебнем і влаштовують піщану подушку, в спеціально відведених місцях облаштовують оглядові колодязі. При монтажі важливо переконаватися, що запірна арматура розташовується точно в відведених місцях під бетонними плитами, щоб до неї можна було забезпечити доступ.

Робота з траншеєю починається тільки після тестування трубопроводів, необхідно переконаватися в їх повній працездатності. Після цього на них насипається і трамбується шар піску, далі пошарово насипається ґрунт. Товщина шару складає близько 0,5 м. Кожен з них потрібно вручну утрамбувати, після чого засипається наступний шар.

Варто зазначити, що ущільнення ґрунту повинно здійснюватися з урахуванням фізичної моделі

взаємодії ущільнюючої машини і середовища (ґрунту). Також, окрім фізичних властивостей ґрунту необхідно враховувати режим впливу машини на середовище (поєднання статичних та динамічних амплітудно-частотних характеристик машини) [1, 9, 10]. Методи ущільнення ґрунту в складних умовах із застосуванням механічного та гідравлічного обладнання наведено на рис. 3, 4.

Місця, де до основи будинку прокладаються різні підземні комунікації, засипаються м'яким ґрунтом, який не потрібно утрамбовувати. Ущільнення ґрунтів зворотних засипок здійснюється рівномірно по всій довжині фундаменту, щоб тиск ґрунту на стіни був однаковим.

Ефективність застосування того чи іншого методу та режиму ущільнення ґрунту залежить від механічного складу ґрунту, вологості ґрунту, тривалості вібрації.



Рис. 3. Ущільнення ґрунту мінікотками



Рис. 4. Ущільнення ґрунту навісними гідротрамбівками

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. Важливим чинником застосування того чи іншого методу ущільнення ґрунту є вибір та оптимальне поєднання комплекту машин для засипання та ущільнення ґрунту. В складних умовах будівельного майданчика застосування засобів малої механізації, систем дистанційного контролю, автоматизованого та напівавтоматизованого обладнання в комплексі з ефективними технологічними рішеннями дозволяє вирішувати достатньо складні задачі за мінімальної трудомісткості і мінімальних фінансових витрат.

Висновки

1. Огляд існуючих методів ущільнення ґрунту виявив доцільність дослідження методів ущільнення ґрунту в складних умовах будівництва з метою підбору оптимального комплекту ущільнюючого обладнання.
2. Проведено аналіз існуючих технологій ущільнення ґрунту з ціллю визначення оптимальних технологічних чинників процесу ущільнення ґрунтів в складних умовах будівництва.
3. Запропоновано теоретико-експериментальний метод вибору механізованих комплексів для ущільнення ґрунтів в складних умовах будівництва.

Список літератури:

1. Басараб В.А. Визначення технологічних параметрів процесу ущільнення ґрунту. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2020. № 45. С. 3–15.
2. Басараб В., Уманець І., Саушева Л. Методика вибору комплекту засобів ущільнення ґрунту пазах котлованів і траншей за технічною ознакою. *Основи та фундаменти*. 2021. Вип. 43. С. 67–78.

3. Махиня О., Яремко Н. Вплив параметрів землерийних машин на конструктивні рішення бареттних паль. *Просторовий розвиток*. 2023. №3. С.74–89.
4. Молодід О.О., Тонкачев Г.М., Молодід О.С. Методика впровадження у будівництво нових конструктивно-технологічних рішень з відновлення будівельних конструкцій. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2018. № 37. С. 163–171.
5. Осипов А.Ф. Основные принципы проектирования динамически трансформирующихся технологических систем. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2000. Вип. 67. С. 162-165.
6. Осипов, О., Литнарвич, С., Осипов, С. та ін. Методи зведення фундаментів на складному рельєфі. *Містобудування та територіальне планування*. 2021. № 78. С. 414–425.
7. Терновий В.І., Уманець І.М. BIM у технології будівельних процесів. *Будівельне виробництво*. 2019. № 67. С. 37–40.
8. Хмара Л.А., Шатов С.В., Карпушин С.О. Удосконалення конструкції самохідних котків. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение*. 2017. №97. С. 105–111.
9. Basarab V.A. Study of the Dynamical Parameters of Vibration Machine for Compaction of Construction Mixes. *International Applied Mechanics*. 2020. 56, No. 6, 750 – 761.
10. Basarab V.A. Polyfrequency vibrations of electromagnetic shock and vibration system. *International Applied Mechanics*. 2021. 57, No. 5, 604–612.
11. Tonkacheiev H.M., Molodid O.S., Galinskiy O.M., Plokhuta R.O., Rudnieva I.M., Priadko I.M. The technology of crack repair by polymer composition. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2022. Vol. 108. P. 203–216.
12. Shpakova H., Honcharenko T., Savenko V., Zinchenko M.. Smart Information System for Creating Digital Twins of Construction Project. *IEEE 2022 International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*, 28-30.04.2022.

References:

1. Basarab, V.A. (2020). Determination of technological parameters of the soil compaction process. *Ways to increase the efficiency of construction in the formation of market relations*, 45, 3–15.
2. Basarab, V., Umanecj, I., Sausheva, L. (2021). Methodology for choosing a set of means for compacting the soil of pits and trenches according to technical characteristics. *Basics and foundations*. 43, 67–78.
3. Makhynja, O., Jaremko, N. (2023). Influence of parameters of earthmoving machines on structural solutions of barret piles. *Spatial development*. 3, 74–89.
4. Molodid O.O., Tonkachejev Gh.M., Molodid O.S. (2018). Methodology of introducing new structural and technological solutions for the restoration of building structures into construction. *Ways to increase the efficiency of construction in the formation of market relations*. 37, 163–171.
5. Osypov, O.F. (2000). Basic principles of designing dynamically transforming technological systems. *Prykladna gheometrija ta inzhenerna ghrافika*, 67, 162–165.
6. Osypov, O., Lytnarovych, Je., Osypov, S. and others. (2021). Methods of erecting foundations on complex terrain. *Urban planning and territorial planning*. 78, 414–425.
7. Ternovyj, V.I., Umanecj, I.M. (2019). BIM in technology of construction processes. *Construction production*. 67, 37–40.

8. 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.
9. Basarab, V.A. (2020). Study of the Dynamical Parameters of Vibration Machine for Compaction of Construction Mixes. *International Applied Mechanics*. 56, No. 6, 750–761.
10. Basarab, V.A. (2021). Polyfrequency vibrations of electromagnetic shock and vibration system. *International Applied Mechanics*. 57, No. 5, 604–612.
11. Tonkacheiev, H.M., Molodid, O.S., Galinskiy, O.M., Plokhuta, R.O., Rudnieva, I.M., Priadko, I.M.. (2022). The technology of crack repair by polymer composition. *Strength of Materials and Theory of Structures*. Vol. 108 P. 203–216.
12. Shpakova, H., Honcharenko, T., Savenko, V., Zinchenko, M.. Smart Information System for Creating Digital Twins of Construction Project. *IEEE 2022 International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*, 28-30.04.2022.

I. Umanets, V. Basarab

Technological factors of the process of soil compaction in complex construction conditions

The article is devoted to the technology of mechanical soil compaction in difficult construction site conditions. The compaction of the soil occurs due to certain force loads on the soil. The actuality of the soil compaction process, which ultimately determines the quality of construction product, was emphasized. The basic physical and mechanical properties of soil and technological parameters of the compaction process were given. Attention is focused on the fact that the choice of soil compaction technology in difficult conditions is based on the understanding of the fact that it is necessary to consider the compaction process as a complex model of the interaction of the compaction machine with the base soil. It is noted that the choice of the mode of static or dynamic action on the base soil depends on the correct choice of the mathematical model of the machine-soil interaction system. An overview of the existing methods of soil compaction was conducted and the feasibility of researching methods of soil compaction in difficult construction conditions was substantiated in order to select the optimal set of compaction equipment. An analysis of existing soil compaction technologies was carried out with the aim of determining the optimal technological parameters of the soil compaction process in difficult construction conditions. The technological scheme of the soil compaction process in difficult conditions was given. The technology of the works is described, taking into account the properties of the soil, the method of compaction, the parameters of the compaction equipment, as well as the conditions of the works. The main technological parameters of the soil compaction process are proposed - the thickness of the compacted soil layer, the number of passes of the compaction machine, as well as the speed of its movement. A theoretical-experimental method of finding the optimal parameters of the interaction of the compaction machine with the base soil is proposed in order to establish the optimal limits of the varied parameters of the technological process of soil compaction in complex construction conditions. An analysis of structural and technological parameters of compacting machines was carried out with the aim of effective use in the conditions of construction production. Basic recommendations for choosing a compaction method and a set of compacting equipment were given, depending on the type of soil and conditions of work.

Key words: soil compaction technology, technological process, technological parameters of the soil compaction process.