

**ЛІКВІДАЦІЯ ПРОСАДНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛЕСОВИХ ГРУНТІВ ШЛЯХОМ
ВПРОВАДЖЕННЯ В НИХ ТВЕРДОГО МАТЕРІАЛУ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИБУХУ**

Розглянуто математичне моделювання процесу армування просадних лесових ґрунтів шляхом впровадження в них твердого матеріалу (щебеню) за допомогою енергії вибуху.

Вступ. Осідання в підставах будинків і споруджень, при зволоженні, призводить до зниження їх міцнісних параметрів, надійності й довговічності, часто стають причиною аварій. Ліквідація небезпечних наслідків цих деформацій і забезпечення експлуатаційної придатності побудованих споруджень на лесових просадних ґрунтах, вимагає великих трудових і фінансових витрат. Лесові просадні ґрунти широко поширені в Україні, і щоб будувати на цих ґрунтах, необхідно прогнозувати розвиток просадних деформацій у часі, призначити й виконати різні інженерні заходи, що знижують шкідливі наслідки деформацій осідання. Ці заходи супроводжуються значними витратами й часто не виправдовуються, оскільки не ліквідуються просадні властивості цих ґрунтів.

У зв'язку з цим особливу актуальність здобувають проблеми вдосконалення й подальшого розвитку методів зі зниження або ліквідації просадних властивостей лесових ґрунтів.

Відомо, що осідання лесової породи виникає в результаті її зволоження, але припиняється не відразу після насичення її водою, а триває тривалий час, що пов'язано з повільним характером руйнування водостійких агрегатів. Тривалість розпаду водостійких агрегатів залежить від багатьох факторів: складу ґрунтової води, температури води, руху води, властивості цементуючих речовин у складі водостійких агрегатів та ін. Просадні деформації в лесових ґрунтах, що звожуються, можуть виникати як в умовах природного напруженого стану, так і під дією зовнішнього навантаження від ваги будинку й спорудження. Тому випадкове зволоження, особливе зволоження гарячою водою підстави, може викликати серйозні аварії будинку й споруди й призвести їх до стану повної непридатності для подальшої експлуатації.

Вивченням просадних ґрунтів займалися багато провідних учених: Цитович Н.А. [1], Абелев Ю.М. [6], Денисов Н.Я. [2], Крутов В.І. [3], Мустафаєв А.А. [4, 5], Клепиков С.Н. [8] та інші.

Однак ефективні способи ліквідації просадних властивостей цих ґрунтів дотепер відсутні.

Мета роботи – використовуючи хвилі стиснення при вибуху ліквідувати просадні властивості лесових ґрунтів шляхом впровадження твердих матеріалів у тіло водонасиченого масиву.

Матеріали і результати досліджень. Розглянемо кілька варіантів впливу хвилі стиснення на тіло в'язко-пружнопластичного середовища водонасиченого масиву з лесових порід.

А. Рух твердого матеріалу в середовищі водонасиченого масиву з лесових порід при простій хвилі стиснення.

Припустимо, що ударна вибухова хвиля вдаряє об поверхню твердого матеріалу, який знаходиться в свердловині, одержує відбиття й змінює напрям, а твердий матеріал починає рух при початковому моменті часу $t = 0$ у перетині свердловини $x = 0$ (рис. 1).

Якщо при $t = 0$ прискорення твердого матеріалу (щебенів) дорівнює нулю, тоді від щебеню розповсюджується проста хвиля яка опишеться такими рівняннями:

$$x = (u + v) \cdot t + f(u);$$

$$u = \frac{2}{n-1} \cdot (v - v_r). \quad (1)$$

Оскільки при $u = 0$, $v = v_r$, то значення довільної функції $f(u)$ визначиться із закону руху метання твердого матеріалу (щебенів), що зручно задавати в такому вигляді:

$$f(u) = x_q - (u + v) \cdot t_q. \quad (2)$$

Тоді перше рівняння з (1) прийме вигляд:

$$\frac{x - x_q}{t - t_q} = u + v, \quad (3)$$

де v_r – початкова швидкість звуку в газі, необуреному рухом, для практичних розрахунків можна приймати $v_r = 3000$ м/с; x – відстані руху хвилі; x_q – відстані руху твердого матеріалу (щебенів); t – час руху твердого матеріалу при ударній хвилі; u – швидкість переміщення хвилі; u_q – швидкість переміщення твердих матеріалів тобто $\frac{dx_q}{dt} = u_q$; v – початкова швидкість звуку у водонасиченому

масиві ґрунту, для практичних розрахунків при водонасиченому масиві з лесових порід можна приймати $v = 1000$ м/с.

Від ударної простої хвилі руху твердих матеріалів буде мати вигляд: $x = x_q(u_q)$; $t = t_q(u_q)$.

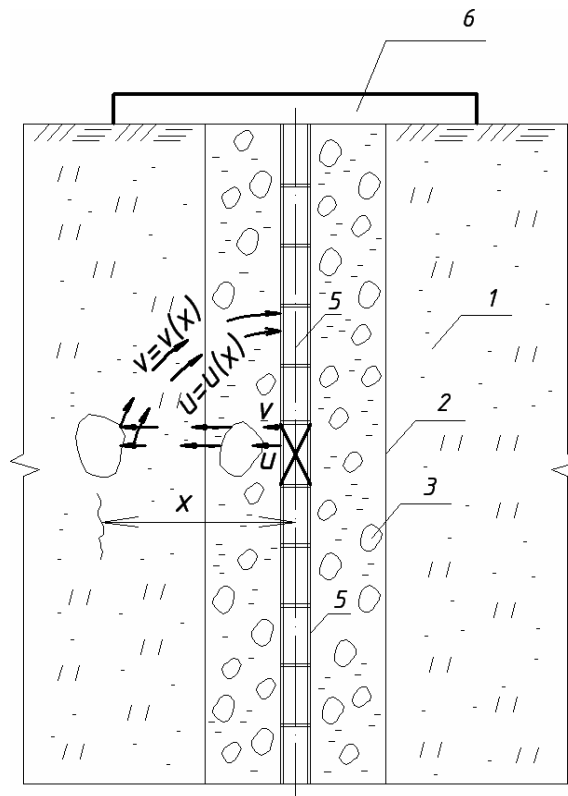


Рис. 1. Схема впровадження твердого матеріалу (3) у тіло водонасиченого масиву з лесових порід (1): 1 – водонасичений масив з лесових ґрунтів; 2 – стінки шпари $d = 600 - 1000$ м; 3 – твердий матеріал (щебені); 4 – ВР; 5 – стінки труби для установки усередині ВР; 6 – інвентарна з/б плита

Зважаючи, що на початковій стадії утворення ударної хвилі деякою мірою впливають на характеристику зсуву твердих матеріалів у середовищі водонасиченого масиву, це можна виразити в такому вигляді:

$$x = x_q + (u + v) \cdot (t - t_q) \tag{4}$$

Це рівняння (4) характеризує рівняння фронту ударної хвилі. Оскільки x_q й t_q є функціями u_q , то, взявши диференціал по u_q , отримаємо:

$$x - x_q - (u + v)(t - t_q) = 0;$$

приходимо до рівняння:

$$(u_q + v_q) \frac{dt_q}{du_q} = \frac{dt_q}{du_q} + \left(1 + \frac{dv}{du}\right) \cdot (t - t_q) \tag{5}$$

Оскільки $\frac{dx_q}{du_q} = u_q \frac{dt_q}{du_q} = \frac{u_q}{g}$; де, $g = \frac{du_q}{dt}$ – прискорення твердих матеріалів при метанні

вибуховою хвилею.

Тоді рівняння (5) приймає вигляд:

$$t - t_q = \frac{v_q}{g} \cdot \frac{1}{1 + \frac{dv}{du}} \tag{6}$$

Звідси знаходимо:

$$x - x_q = \frac{(u + v) \cdot v_q du}{g \cdot d(u + v)} = \frac{v_q dt}{d \ln(u + v)} \tag{7}$$

З формули (6) можна представити $1 + \frac{dv}{du} = \frac{\rho^3 v^4}{2} \cdot \frac{d^2 u}{dp^2}$, де ρ – щільність твердого матеріалу; p – максимальний тиск при вибуху.

В. Впровадження твердого матеріалу в тіло водонасиченого масиву з лесових порід, вибухом та криволінійними хвилями відбиття.

При вибуху у середовищі водонасиченого масиву ударна хвиля вдаряється об твердий матеріал, відбивається від поверхні твердого матеріалу та змінює напрямок його руху від прямокутного до криволінійного. При цьому рівняння швидкості впровадження:

$$\frac{dx}{dt} = u - v; \tag{8}$$

Якщо при ударній хвилі твердий матеріал одержує постійне прискорення метання g , тоді відстань впровадження твердого матеріалу в тіло водонасиченого масиву з лесових порід x_q і час метання t_q буде:

$$x_q = \frac{u_q^2}{2g} = \frac{gl_q^2}{2}; t_q = \frac{u_q}{g}. \tag{9}$$

Звідси:

$$x = (u + v) \cdot \left(t - \frac{u}{g}\right) + \frac{u^2}{2g} = (u + v) \cdot t - \frac{uv}{g} - \frac{u^2}{2g}; \tag{10}$$

Графічне зображення швидкостей руху хвилі u і звуку v при зміні всередині водонасиченого масиву твердих матеріалів, що розлітаються, $u = u(x)$ і $v = v(x)$ для заданого моменту часу t показано на рис. 1.

Слід зазначити що, у випадку адиабатичних тисків вибухової хвилі, які описуються степеневу функцією напруг σ_0 і щільністю стисненого газу ρ_0 , при $p = \sigma_0 \cdot \rho_0^n$, швидкість звуку водонасиченого масиву з лесових ґрунтів v буде залежати від швидкості звуку в газі v_r і швидкості переміщення хвилі у водонасиченому ґрунті u , тобто буде:

$$v = v_r + \frac{n-1}{2} u. \tag{11}$$

Тоді відстань зсуву твердого матеріалу в середовищі водонасиченого масиву буде мати вигляд:

$$v = \left(v_r + \frac{n+1}{2} u\right) \cdot t - \frac{uv_r}{g} - \frac{nu^2}{2g}. \tag{12}$$

Для знаходження часу t і відстані x розльоту твердого матеріалу при криволінійній відбитій ударній хвилі вищенаведені формули (6) і (7) будуть мати такий вигляд:

$$t = \frac{2}{(n+1)g} \cdot (v_r + nu), \tag{13}$$

звідки:

$$x = \frac{2}{(n+1)g} \cdot (v_r + nu) \cdot \left(v_r + \frac{n+1}{2} u\right) - \frac{u}{g} \left(v_r + \frac{nu}{2}\right) = \frac{2}{(n+1)g} \cdot \left(v_r^2 + nv_r u + \frac{n(n+1)}{4} u^2\right). \tag{14}$$

Виключивши із останнього виразу (14) u , приходимо безпосередньо до рівняння відбитої ударної хвилі наступного вигляду:

$$x = v_r t + \frac{1}{2ng} \cdot \left(\frac{n+1}{2} gt - v_r\right)^2 = v_r t + \frac{nu^2}{2g}. \tag{15}$$

Для практичних розрахунків при впровадженні твердого матеріалу (щебеню) у тіла в'язко-пружного або в'язко-пружнопластичного масиву з лесових порід можна приймати $n = 3$ (показник ізентропи).

Мінімальний час утворення ударної хвилі до твердого матеріалу можна визначити зі швидкості звуку в газі v_r формулою:

$$t_{\min} = \frac{2v_r}{(n+1)g}. \tag{16}$$

Помітимо, що повторне відбиття хвилі від поверхні твердих матеріалів дуже мале або рухи твердих матеріалів у тілі водонасиченого масиву загасають.

С. Впровадження твердих матеріалів у тіло водонасиченого масиву з лесових порід у випадку, коли всі відбиті хвилі перетинаються в одній точці.

Припустимо, що всі хвилі, які відбиваються від поверхні твердого матеріалу, прямі та перетинаються в одній точці з координатами $M(x_0, t_0)$, по-іншому, – всі хвилі стиску, що відбиваються, центруються в одній точці $M(x_0, t_0)$ (рис. 2).

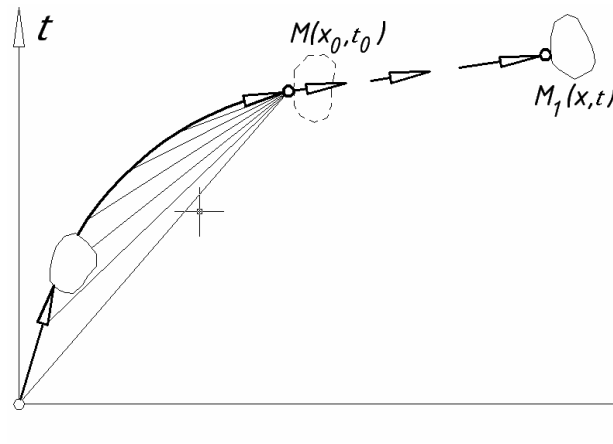


Рис. 2. Схема з перетинання всіх прямих характеристик в одній точці M і переміщення твердого матеріалу в одній площині точки $M_1(x, t)$

Тоді ударна хвиля проявляється, як показано у формулі (1), і збігається з рівняннями простої хвилі, відбитої від поверхні твердого матеріалу.

Якщо рух твердого матеріалу в середовищі водонасиченого масиву з лесових порід ще триває в горизонтальному напрямку в одній площині із крапкою $M(x_0, t_0)$ до крапки $M_1(x, t)$, то рівняння характеристик у площині $M_1(x, t)$ буде мати вигляд:

$$\frac{x - x_0}{t - t_0} = u + v = v_r + \frac{n + 1}{2}u; f(u) = x_0 - (u + v) \cdot t_0 \tag{17}$$

Замінюючи u через dx/dt для твердого матеріалу, що розлітається, одержимо рівняння:

$$\frac{d(x - x_0)}{d(t - t_0)} = \frac{2}{n + 1} \cdot \left(\frac{x - x_0}{t - t_0} - v_r \right) \tag{18}$$

Розв'язуючи це лінійне диференціальне рівняння відносно $x - x_0$, одержимо:

$$\begin{aligned} x - x_0 &= (t - t_0)^{\frac{2}{n+1}} \cdot \left(D - \frac{2v_r}{n-1} \int_{t_0}^t (t - t_0)^{-\frac{2}{n+1}} \cdot d(t - t_0) \right) = \\ &= D \cdot (t - t_0)^{\frac{2}{n+1}} - \frac{2}{n+1} \cdot v_r \cdot (t - t_0), \end{aligned} \tag{19}$$

де D постійна, обумовлена з початкових умов при $t = 0, x = 0$.

$$-x_0 = D \cdot (-t_0)^{\frac{2}{n+1}} + \frac{2}{n+1} \cdot v_r \cdot t_0 \tag{20}$$

Вставляючи в останнє (20) рівність $x_0 = v_r \cdot t_0$, можна визначити величину постійного D . Підставивши отримане значення D в загальний інтеграл, можна описати рух твердого матеріалу (щебеню) в середовищі водонасиченого масиву з лесових порід у вигляді:

$$x = x_0 + \frac{2}{n+1} \cdot v_r \cdot (t - t_0) - \frac{n+1}{n-1} \cdot v_r \cdot t_0^{\frac{n+1}{n-1}} \cdot (t - t_0)^{\frac{2}{n+1}} \tag{21}$$

Таким чином, у випадку, коли всі, що відбивають, перетинаються в одній точці внутрішніх твердих матеріалів, заглиблюються в тіло водонасиченого масиву ще більше.

D. Впровадження твердих матеріалів у тіло водонасиченого масиву з лесових порід у випадку передачі коливальних сил вибухової хвилі.

Розглянемо тверді матеріали під дією вибухової хвилі, які під час розльоту усередині водонасиченого масиву мають коливання (перевертання) від передачі коливань газу за синусоїдальним законом, тобто $u = u_k \cdot \sin \omega t$, де u_k – кінцева величина швидкості руху газу; ω – частота коливань газу при вибуху; u – швидкість руху газу при вибуху.

У такий спосіб від коливань кінцевої амплітуди, тверді матеріали, що занурюються у середовищі водонасиченого масиву, ущільнюються та зміцнюються масив.

При синусоїдальному коливанні твердих матеріалів у масиві довільна функція $f(u)$ визначається із граничної умови, відповідно до якого при $x = 0$:

$$u = \varphi(t) = u_k \cdot \sin \omega t; u = \psi(u) = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{u}{u_k} \tag{22}$$

Тоді довільна функція $f(u)$, що входить у формулу (1), буде мати вигляд:

$$f(u) = -(u + v) \cdot \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{u}{u_k} . \tag{23}$$

Розв'язок рівняння (23) можна записати в наступному вигляді:

$$x = (u + v) \cdot \left(t - \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{u}{u_k} \right), \tag{24}$$

у більш зручній формі:

$$u = u_k \cdot \sin \omega \cdot \left(t - \frac{x}{u + v} \right). \tag{24'}$$

Звідси видно, що при $x = 0$ цей розв'язок (24) або (24') дає $u = u_k \cdot \sin \omega t$, що є перевіркою його правильності.

Оскільки у щелепі при русі його у середині тіла водонасиченого масиву виникає швидкість руху:

$$\frac{dx_q}{dt} = u_q \cdot \sin \omega \cdot \left(t - \frac{x_q}{v_r + \frac{n+1}{2} \cdot u_q} \right) \text{ або}$$

$$\frac{dx_q}{dt} = u_k \cdot \sin \omega \cdot \left(t - \frac{x_q}{v_r + \frac{n+1}{2} \cdot \frac{dx_q}{dt}} \right), \tag{25}$$

то з розв'язку цього рівняння можна визначити закон коливання твердих матеріалів усередині водонасиченого масиву.

Рівняння (24') описує хвилю, що біжить, довільної амплітуди при русі твердих матеріалів у середовищі водонасиченого ґрунтового масиву.

Якщо зсув твердих матеріалів, що занурюються, усередині водонасиченого ґрунтового масиву дуже малий (тобто величини u й $v - v_r$ малі), то, зневажаючи цими величинами порівняно з v та v_r , можна знайти звукові хвилі рівнянням:

$$u = u_k \cdot \sin \omega \cdot \left(t - \frac{x}{v_r} \right). \tag{26}$$

Отриманий розв'язок в (24') для коливань кінцевої амплітуди в початковий момент часу являє собою гармонійне синусоїдальне коливання твердих матеріалів у тілі водонасиченого ґрунтового масиву й відрізняється від звукового коливання газу лише величиною амплітуди. Через якийсь час у результаті збільшення залишкових деформацій хвиля втратить свою синусоїдальну форму, фронт її буде ставати все більше крутим і хвиля стане в деякий момент часу ударною.

Якщо прирівняти до нуля похідну $dx/du = 0$ та $d^2x/du^2 = 0$, то можна знайти величину частоти в часі ωt і переміщення твердих матеріалів у середовищі водонасиченого ґрунтового масиву u у такому вигляді:

$$\omega t = \arcsin \frac{u}{u_k} + \frac{1}{\sqrt{u_k^2 - u^2}} \cdot \left(\frac{2}{n+1} v_r + u \right); \quad u = \frac{v_r}{n+1} \pm \sqrt{\left(\frac{v_r}{n+1} \right)^2 + 2u_k^2}. \tag{27}$$

Рівняння (24') і (27) визначають координати й швидкість газу в момент утворення ударної хвилі при вибуху. Завдяки періодичності коливань ударні хвилі при вибуху починають утворюватися в різні моменти часу й у різних місцях незалежно одна від одної.

У періодичних коливаннях при русі твердих матеріалів у середовищі водонасиченого масиву з формул: $x_q = x_0 \cdot \sin \omega t$, $u_q = \frac{dx_q}{dt} = x_0 \omega \cos \omega t = u_k \cos \omega t$ можна визначити момент часу t , швидкість впровадження твердих матеріалів у середовище водонасиченого масиву x_q і відстань руху хвилі x формулами:

$$t = \frac{1}{\omega} \arccos \frac{u_q}{u_k}; \quad x_q = x_0 \sqrt{1 - \frac{u_q^2}{u_k^2}}; \quad x = (u + v) \left(t - \frac{1}{\omega} \cdot \arccos \frac{u}{u_k} \right) + x_0 \sqrt{1 - \frac{u_q^2}{u_k^2}}. \tag{28}$$

У випадку малих коливань (при $x_0 \rightarrow 0$) це співвідношення виражається рівнянням звукової хвилі, що біжить, косинусоїдального типу:

$$u = u_k \cdot \cos \omega \cdot \left(t - \frac{x}{v_r} \right). \tag{29}$$

З останніх висловлювань можна укласти, що при періодичному русі матеріалів усередині водонасиченого масиву з лесових порід виникають попеременно хвилі стиску й розрідження.

Коли хвиля стиску при русі в середовищі водонасиченого масиву натрапляє на яку-небудь перешкоду (у вигляді твердих включень) обов'язково виникають ударні хвилі, які й забезпечують далекий розліт цих включень.

Таким чином, було розглянуто різні варіанти впливу хвиль стиснення на впровадження твердого матеріалів у тіло водонасиченого масиву з лесових порід. Були математично модельовані процеси, які протікають при вибуху в шпарі, заповненій твердим матеріалом (щебенем), який ударна вибухова хвиля метає і з силою впроваджує в середовище в'язко-пружного або в'язко-пружно-пластичного масиву з водонасиченого лесового ґрунту.

На основі вищевикладеного, можна зробити такі висновки:

1. Вибухова ударна хвиля у вигляді стиску й розрідження вдаряється об поверхню твердого матеріалу, яким заповнена шпара, відбивається й може поширюватися як у прямолінійному, так й у криволінійному напрямку. При цьому від ударної хвилі твердий матеріал отримує постійне або наростаюче прискорення метання, яке впроваджує цей твердий матеріал в тіло водонасиченого масиву з лесових ґрунтів.

2. Тверді матеріали, впроваджені в тіло в'язко-пружного або в'язко-пружно-пластичного масиву, відіграють роль армуючого матеріалу, що забезпечує ліквідації просадних властивостей лесових ґрунтів.

3. Хвиля стиснення при впровадженні твердого матеріалу до складу водонасиченого масиву, повільно загасає й надає здатність до збільшення залишкових деформацій й ущільнень в'язко-пружного або в'язко-пружно-пластичного середовища.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Цытович Н.А.* Основания и фундаменты. – М.: Высш. шк., 1970. – 382 с.
2. *Денисов Н.Я.* Строительные свойства лесса и лессовидных суглинков. – М–Л.: Госстройиздат, 1951. – 156 с.
3. *Крутов В.И.* Основания и фундаменты на просадочных грунтах. – К.: Будівельник, 1982. – 224 с.
4. *Мустафаев А.А.* Фундаменты на просадочных и грунтах, которые набухают. – Г.: Высшая школа, 1989. – 590 с.
5. *Мустафаев А.А.* Основы механики просадочных грунтов. – Г.: Стройиздат, 1978. – 236 с.
6. *Абелев Ю.М., Абелев М.Ю.* Основы проектирования на просадочных и микропористых грунтах: 2-е изд., перераб. и доп. – Г.: Госстройиздат, 1968. – 431 с.
7. *Самедов А.М.* О реологических модели лессовых просадочных грунтов // Вісник НТУУ "КПІ" / Гірництво. – Вып. 3. – Київ. – 2000. – С. 39–44.
8. *Клепиков С.М., Трегуб А.С., Матвеев И.В.* Расчет зданий и сооружений на просадочных грунтах. – К.: Будівельник, 1987. – 198 с.
9. Рекомендации из уплотнения просадочных грунтов большой мощности гидровзрывным методом / НИИСК Госстроя СССР. – Г.: Стройиздат, 1984. – 54 с.

ЗУЄВСЬКА Наталя Валеріївна – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України "КПІ".

Наукові інтереси:

- вибухові роботи;
- гірництво;
- геобудівництво.

Подано 03.04.2008

Зуєвська Н.В. Ликвідація просадних властивостей лесових ґрунтів шляхом впровадження в нього твердого матеріалу за допомогою вибуху

Зуевская Н.В. Ликвидация просадочных свойств лессовых грунтов путем внедрения в него жесткого материала при помощи взрыва

Zuevska N.V. Liquidation of settlement property of loess soils by introduction in him of hard material through an explosion

УДК 624.159.1 +539.3

Ликвидация просадочных свойств лессовых грунтов путем внедрения в него жесткого материала при помощи взрыва / Н.В. Зуевская

Рассмотрено математическое моделирование процесса армирования просадочных лессовых грунтов путем внедрения в них твердого материала (щебня) с помощью энергии взрыва.

УДК 624.159.1 +539.3

Liquidation of settlement property of loess soils by introduction in him of hard material through an explosion / Zuevska N.V.

The mathematical simulation is considered process of reinforcing of settlement loess soils by introduction in them of hard material (crushed stone) by energy of explosion.