

## ПАРАМЕТРИ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ҐРУНТОРУЙНУЮЧИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ З УРАХУВАННЯМ РОЗПОДІЛЕННЯ ПОТОКІВ ЕНЕРГІЇ

*АНОТАЦІЯ.* Розглянуто взаємодію між робочим органом та масивом ґрунту, що розроблюється, врахувавши різні варіанти руху різального елемента. Визначено силові параметри при забезпеченні структурованого робочого процесу руйнування ґрунту, враховуючи рух різального елемента відносно денної поверхні ґрунтового масиву.

*Ключові слова:* структурований робочий процес, потоки енергії, енергоємність, хвилі напружень, сила тяжіння.

*АННОТАЦИЯ.* Рассмотрено взаимодействие между рабочим органом и разрабатываемым грунтовым массивом, учитывая различные варианты движения резательного элемента. Определены силовые параметры для обеспечения структурированного рабочего процесса разрушения грунта, учитывая движение режущего элемента относительно дневной поверхности грунтового массива.

*Ключевые слова:* структурированный рабочий процесс, потоки энергии, энергоёмность, волны напряжений, сила тяжести.

*SUMMARY.* The interaction between the working body and an array of ground being developed, taking into account different options of movement of cutting element. The power parameters of providing structured working process of soil destruction, given the movement of cutting element relative to the day surface an array of ground.

*Key words:* structured workflow, the flow of energy saving, full-surface, wave stress, attractive power.

### Вступ

Треба зазначити, що складові, які визначають систему розробки робочих середовищ, мають взаємний вплив одна на одну. Так параметри технічних систем взаємно залежать від характеристик робочих середовищ і робочих процесів, за яких вони діють на робоче середовище.

Інформаційність (структурованість) робочих процесів визначає доцільність розподілення потоків енергії, що спрямовані від розроблюваних елементів робочих органів технічних систем до робочого середовища. Доцільне розподілення цих потоків створює мінімальну енергоємність робочого процесу.

### Мета і постановка задачі

Структурованість процесу розробки робочих середовищ є керування у часі і просторі потоками енергії таким чином, щоб енергія передалась на робоче середовище потрібної потужності і щільності у визначену точку робочого середовища і у визначений час. Критерієм структурованості

процесу розробки ґрунтів є енергоємність робочого процесу технічних систем. Чим менша енергоємність, тим більша структурованість (інформаційність) процесу. З іншого боку треба відзначити, що процес руйнування робочого середовища є процесом його деструктуризації, тобто збільшенням ентропії масиву ґрунту, який руйнується.

Невирішеною проблемою для робочих процесів технічних систем будіндустрії (враховуючи, що всі реальні процеси самочинно протікають зі збільшенням ентропії) є врахування того, що процес розробки робочих середовищ повинен бути більше спрямований до природного напрямку протікання процесу, що дає можливість зменшити додаткові витрати енергії на руйнування ґрунту.

Ціль роботи – встановлення залежностей для визначення параметрів структурованого робочого процесу за різних напрямків руху різального елемента в масиві ґрунту.

Задачею даного дослідження є визначення взаємодії між робочим органом та

масивом ґрунту, що розроблюється, розглядаючи різні варіанти руху різального елемента при забезпеченні структурованого робочого процесу.

**Виклад основного матеріалу**

Традиційне розподілення потоків енергії під час розробки ґрунтів (рис. 1) не дає можливості найбільш повного використання енергії робочого органа для руйнування ґрунтів. Хвилі деформацій, що виникають при одиничних сколах елементів ґрунту, розповсюджуються вглиб масиву і затухають в ньому, що призводить до нераціонального використання енергії.

У цьому разі сила тяжіння відокремленого елемента ґрунту притискує цей елемент до масиву і для видалення його також необхідно використати енергію.

Формування потоків енергії таким чином, щоб енергія робочого органа найбільш ефективно використовувалась для руйнування робочого середовища, наведено на рис. 2 і рис. 3.

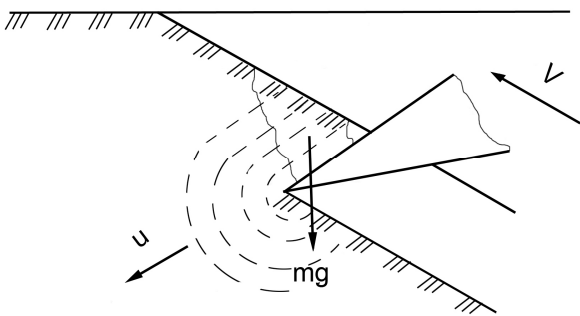


Рис. 1. Розповсюдження хвиль напружень (деформацій) в масиві ґрунту

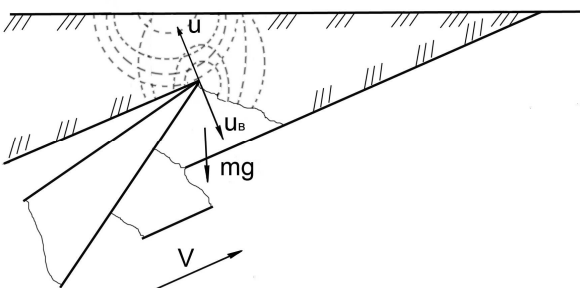


Рис. 2. Розповсюдження хвиль напружень (деформацій) в масиві ґрунту за структурованого потоку енергії (рух до денної поверхні)

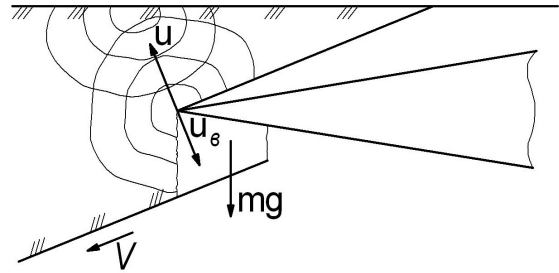


Рис. 3. Розповсюдження хвиль напружень (деформацій) в масиві ґрунту за структурованого потоку енергії (рух від денної поверхні)

У цих випадках ґрунт, що руйнується, знаходиться над робочим органом і невеликий замкнутий об'єм якого постійно знаходиться під дією прямих, відбитих і заломлених хвиль деформацій (напружень). В цих умовах у ґрунті накопичуються втомлювальні деформації, і межа міцності ґрунту значно зменшується. Крім того, сила тяжіння елемента ґрунту, що відокремився від масиву, сприяє його видаленню, що додатково знижує енергоємність різання.

Розподілення напруження в робочому середовищі при його стисненні за динамічного навантаження знаходиться за формулою [1]

$$\sigma(x, t) = a' \left(\frac{t}{x}\right)^{\nu-1} + b' \left(\frac{t}{x}\right)^{2\nu} + c' \left(\frac{t}{x}\right)^{\nu(1-R)}, \quad (1)$$

де параметри  $a'$ ,  $b'$  та  $c'$  знаходимо з наступних формул:

$$a' = \frac{I \cdot \nu \cdot V^{\nu+1}}{\nu(R-1)}; \quad (2)$$

$$b' = -\frac{I \cdot V^{2(\nu+1)}}{1+R}; \quad (3)$$

$$c' = \frac{\sigma_0 - a' \cdot u^{1-\nu} - b' \cdot u^{-2\nu}}{u^{\nu(R-1)}}, \quad (4)$$

де  $\sigma_0$  і  $I$  – відповідно напруження і густина робочого середовища в зоні, що знаходиться за поверхнею рівних напружень;  $u$  – швидкість розповсюдження хвиль

деформацій в ґрунті;  $R$  – коефіцієнт бокового тиску (характеризує відношення нормальних і дотичних напружень, що виникають в ґрунті під дією динамічних навантажень);  $\nu$  – коефіцієнт, що описує форму фронту хвиль деформацій (плоский рух  $\nu = 0$ , циліндричний рух  $\nu = 1$ , сферичний рух  $\nu = 2$ );  $V$  – швидкість різання.

Число циклів навантажень елемента ґрунту до його сколу від прямих хвиль напружень знаходиться за формулою

$$N_{\text{ск}} = \frac{l_e}{l_{\text{ск}}}, \quad (5)$$

де  $l_{\text{ск}}$  – величина одиничного сколу;  $l_e$  – відстань між різальними елементами, що йдуть „слід в слід”.

Величина одиничного сколу знаходиться з виразу

$$l_{\text{ск}} = (h_p k_h - a)(\text{ctg} \theta - \text{ctg} \delta), \quad (6)$$

де  $h_p$  – глибина різання;  $k_h$  – коефіцієнт контакту різального елемента з ґрунтом залежно від кута різання  $\delta$ ;  $a = h_p(1 - k_{\text{бок}})$  –

довжина бокових зрізів;  $k_{\text{бок}} = \frac{h_1}{h_p}$  –

коефіцієнт глибини частини прорізу, що розширюється;  $h_1$  – глибина, на якій починається

розширення прорізу;  $\theta = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}$  – кут

між траєкторією різання і переважним напрямком руху елементів стружки;  $\rho$  – кут внутрішнього тертя.

Таким чином, враховуючи (2), запишемо вираз для  $N_{\text{ск}}$

$$N_{\text{ск}} = \frac{l_e}{h_p(k_h - 1 + k_{\text{бок}})(\text{ctg} \theta - \text{ctg} \delta)}. \quad (7)$$

З урахуванням відбитих і заломлених хвиль деформацій (напружень) при змінних напруженнях, еквівалентне напруження стиснення визначається за формулою

$$\sigma_{\text{екв.ст}} = \frac{\sum_{i=1}^{N'_{\text{ск}}} \sigma_{i,\text{ст}}}{N_{\text{ск}}}, \quad (8)$$

де  $\sigma_{i,\text{ст}}$  – напруження стиснення для точки робочого середовища, що руйнується від  $i$ -го сколу ґрунту.

Аналогічно для напружень розтягнення і зсуву

$$\sigma_{\text{екв.р}} = \frac{\sum_{i=1}^{N''_{\text{ск}}} \sigma_{i,\text{р}}}{N_{\text{ск}}}, \quad (9)$$

$$\tau_{\text{екв.зс}} = \frac{\sum_{i=1}^{N'''_{\text{ск}}} \tau_{i,\text{зс}}}{N_{\text{ск}}}, \quad (10)$$

тут  $\sigma_{i,\text{р}}$  і  $\tau_{i,\text{зс}}$  – відповідно напруження розтягнення і зсуву для точки робочого середовища, що руйнується від  $i$ -го сколу.

Числа циклів навантажень при стисненні  $N'_{\text{ск}}$ , розтягненні  $N''_{\text{ск}}$  і зсуву  $N'''_{\text{ск}}$  за структурованого розподілення енергії більші за число сколів  $N_{\text{ск}}$  внаслідок виникнення відбитих і заломлених хвиль напружень, що значно зменшують напруження, за яких відбувається руйнування робочого середовища.

Таким чином за структурованого розподілення енергії навантаженню піддається невеликий об'єм ґрунту, в якому виникають знакозмінні напруження. У цьому разі коефіцієнт асиметрії циклу для нормальних напружень визначиться за формулою

$$r_N = \frac{\sigma_{\text{екв.р}}}{\sigma_{\text{екв.ст}}} \quad (11)$$

і для дотичних напружень

$$r_\tau = \frac{\tau_{\text{екв.зс}}^{\min}}{\tau_{\text{екв.зс}}^{\max}}. \quad (12)$$

З підвищенням структурованості процесу руйнування зростає кількість циклів навантажень на робоче середовище. При цьому збільшується амплітуда напружень розтягнення і коефіцієнт асиметрії циклу за модулем (він набуває від'ємного значення); додатково до цього також збільшується коефіцієнт асиметрії для дотичних напружень. Всі ці фактори призводять до значного зниження енергоємності процесу руйнування робочого середовища.

В загальному випадку руйнування робочих середовищ відбувається за сумісної дії складових сили різання (рис. 4), а саме складової, що забезпечує зсув частин ґрунту

тової стружки відносно масиву  $F_{зс}$ , та складової  $F_B$ , що забезпечує відрив ґрунту.

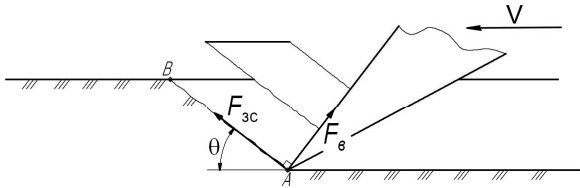


Рис. 4. Схема складових сил, що діють на зсув і відрив елемента робочого середовища

З діаграми зсуву зв'язних ґрунтів (рис. 5) отримуємо, що сумісна дія зсувної сили і сили відриву на робоче середовище характеризується кривою діаграми між точками  $2''$  і  $1'$ .

У цьому разі чистий зсув по поверхні АВ (рис. 4) відбувається за граничних дотичних напружень зсуву  $\tau_{зс}''$  при відсутності нормальних напружень (точка  $2''$ , рис. 5), а чистий відрив – за граничних нормальних напружень розтягнення  $\sigma_p'$  за відсутності дотичних напружень (точка  $1'$ ).

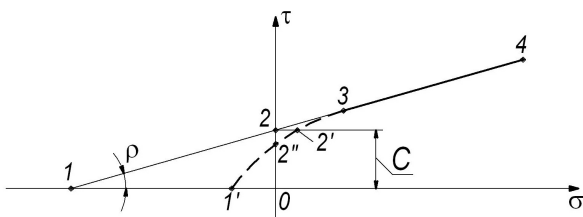


Рис. 5. Діаграма зсуву зв'язних ґрунтів

За динамічного навантаження при руйнуванні зсувом діаграма  $\tau = \int \tau(\gamma)$  наведена на рис. 6.

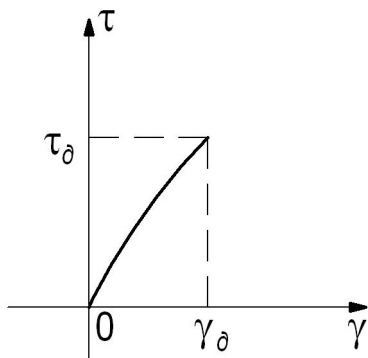


Рис. 6. Діаграма динамічного зсуву

Для малих деформацій

$$\tau = G\gamma, \quad (13)$$

де  $\tau$  – дотичні напруження, що виникають в робочому середовищі за його динамічного навантаження в умовах чистого зсуву;  $G$  – модуль зсуву;  $\gamma$  – кут зсуву (відносний зсув).

За малих деформацій

$$\gamma \approx \text{tg} \gamma \approx \frac{\Delta x}{x}, \quad (14)$$

де  $\Delta x$  – абсолютний зсув (абсолютна деформація зсуву в перерізі, що розглядається);  $x$  – відстань від перерізу, що розглядається, до недеформованого перерізу.

Модуль зсуву  $G$  подібний до модуля пружності  $E$  і визначається за формулою

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}, \quad (15)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

В ізотропному робочому середовищі швидкість розповсюдження поперечних хвиль визначається за формулою

$$u_1 = \sqrt{\frac{G}{I}}. \quad (16)$$

Питомий опір динамічному руйнуванню ґрунту (визначений для стиснення) [1]:

$$k_d = IV^2 + \sigma_d \varepsilon_d, \quad (17)$$

де  $\sigma_d$  – динамічна межа міцності робочого середовища на стиснення;  $\varepsilon_d$  – гранична динамічна відносна деформація робочого середовища.

Аналогічно питомий опір динамічному руйнуванню зсувом

$$k_{d1} = IV^2 + \tau_d \gamma_d, \quad (18)$$

де  $\tau_d$  – динамічна межа міцності робочого середовища на зсув;  $\gamma_d$  – динамічний кут зсуву (відносний динамічний зсув).

Сила, необхідна для динамічного руйнування за чистого зсуву

$$F_{зс} = S\tau, \quad (19)$$

де  $S$  – площа зсуву елемента, що відокремлюється;  $\tau$  – дотичне напруження, за якого відбувається динамічне руйнування робочого середовища за певного напруження розтягнення на поверхні зсуву (рис. 5, крива між точками  $1'$  і  $2''$ ).

За трапецієподібної форми прорізу відокремлений елемент ґрунту має вигляд усіченого конуса.

Тоді маємо

$$S \approx 0,5 \cdot \pi \frac{h^2 k_{\text{бок}} \text{ctg} \theta}{\sin \theta} (2 - k_{\text{бок}}) \quad (20)$$

і

$$F_{\text{зс}} \approx 0,5 \cdot \pi \tau \frac{h^2 k_{\text{бок}} \text{ctg} \theta}{\sin \theta} (2 - k_{\text{бок}}), \quad (21)$$

Відрив відбувається по тій же поверхні з площею  $S$ .

При цьому максимальне напруження відриву визначиться з формули

$$\sigma_{\text{в}} = \frac{F_{\text{в}}}{S} + \frac{M_{\text{в}}}{W}, \quad (22)$$

тут  $M_{\text{в}}$  – момент сили відриву відносно центра тяжіння перерізу  $S$ ;  $W$  – момент опору перерізу  $S$ .

Для визначення моменту опору перерізу  $W$  слід зазначити, що переріз  $S$  є рівнобічна трапеція з висотою  $H = hk_{\text{бок}}$  і основами:  $a = 2h(1 - k_{\text{бок}}) \text{ctg} \theta$  та  $b = 2h \text{ctg} \theta$ . Сила  $F_{\text{в}}$  умовно прикладена до середини основи  $a$ , перпендикулярно до площини трапеції.

Враховуючи вищезазначене, маємо

$$F_{\text{в}} = \frac{\sigma_{\text{в}} WS}{W + Sc}, \quad (23)$$

де  $c$  – плече сили  $F_{\text{в}}$  відносно центра тяжіння перерізу  $S$ .

Таким чином треба відмітити, що найменша енергоємність розробки ґрунту реалізується в зоні сумісної дії напружень відриву і зсуву. Крім того вплив сили тяжіння, що діє на елемент ґрунту, який відокремлюється, на енергоємність роботи технічних систем який визначимо з аналізу наступних залежностей.

За традиційного руху технічних систем залежності нормальної і дотичної складових сили тяжіння знаходимо з рис. 7.

Притискаючу силу  $F_{\text{п}}$  та силу, протилежну зсуву  $F_{\text{пз}}$ , можна визначити з відношень:

$$F_{\text{п}} = mg \cos(\varphi), \quad (24)$$

і

$$F_{\text{пз}} = mg \cos(\xi). \quad (25)$$

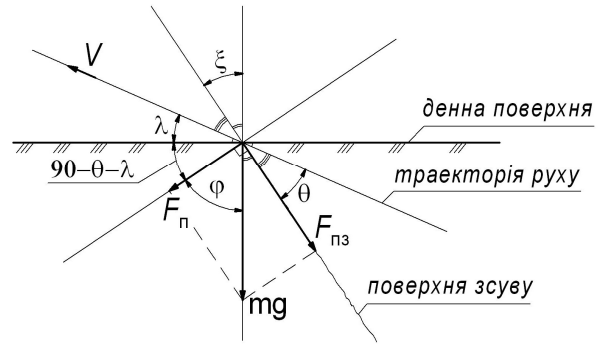


Рис. 7. Схема дії сил за традиційного руху різального елемента

Зробивши відповідні перетворення, отримаємо, що:

$$F_{\text{п}} = mg \cos(\theta + \lambda), \quad (26)$$

і

$$F_{\text{пз}} = mg \sin(\lambda + \theta), \quad (27)$$

де  $m$  – маса елемента стружки ґрунту;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $\lambda$  – кут нахилу траекторії руху різального елемента до денної поверхні ґрунту.

Далі розглянемо технічну систему за структурованого робочого процесу.

Перший випадок: структуроване розподілення енергії, рух від денної поверхні ґрунтового масиву (рис. 8).

Сила в напрямку зсуву

$$F_{\text{зс}} = mg \cos(\varphi'). \quad (28)$$

Зробивши відповідні перетворення, отримаємо:

$$F_{\text{зс}} = mg \sin(\theta + \lambda), \quad (29)$$

Сила відриву по поверхні зсуву  $F_{\text{в}}$  від сили тяжіння елемента стружки ґрунту

$$F_{\text{в}} = mg \cos(\theta + \lambda), \quad (30)$$

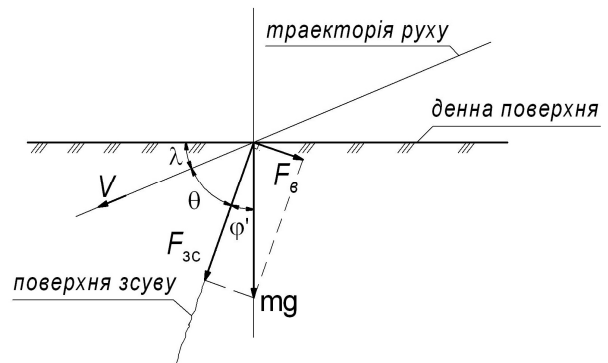


Рис. 8. Схема дії сил за структурованого потоку енергії (рух від денної поверхні)

Другий випадок: структуроване розподілення енергії, рух до денної поверхні ґрунтового масиву (рис. 9).

Сила зсуву

$$F_{зс} = mg \cos(\xi). \quad (31)$$

Зробивши відповідні перетворення, отримаємо:

$$F_{зс} = mg \sin(\theta - \lambda). \quad (32)$$

Сила відриву

$$F_{в} = mg \cos(\theta - \lambda). \quad (33)$$

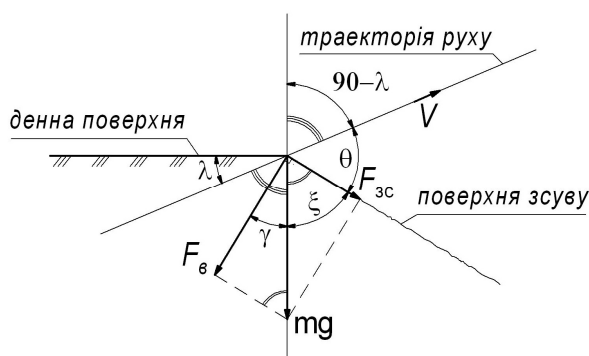


Рис. 9. Схема дії сил за структурованого потоку енергії (рух до денної поверхні)

Таким чином, за традиційного руйнування робочих середовищ, нормальна складова сила від сили тяжіння притискає елемент до масиву, а тангенційна сила діє протилежно напрямку зсуву цього елемента, що підвищує енергоємність різання. За структурованого у всіх випадках робочого процесу обидві складові зменшують енергоємність розробки робочих середовищ.

### Висновки:

Проаналізувавши отримані залежності слід зазначити, що за традиційного розподілення потоків енергії під час розробки ґрунтів, відбувається втрата енергії хвиль деформацій (які виникають при одиничних сколах ґрунту) за рахунок їх нераціонального спрямування, яке призводить до їх розповсюдження вглиб масиву та подальшого затухання.

Крім того, необхідно додатково витратити енергію для забезпечення видалення відокремленого елемента ґрунту, який сила тяжіння притискає до загального масиву.

За структурованого робочого процесу потоки енергії формуються таким чином, що енергія робочого органа найбільш ефек-

тивно використовується для руйнування робочого середовища. Крім того, в цьому випадку у ґрунті накопичуються втомлювальні деформації, і межа міцності ґрунту значно зменшується. Також, в цьому випадку, сила тяжіння елемента ґрунту, що відділився від масиву, сприяє його видаленню, що додатково знижує енергоємність різання.

В подальших дослідженнях планується дослідження щільності та потужності енергетичних потоків структурованого робочого процесу при динамічному руйнуванні робочих середовищ.

### Література

1. *Робочі процеси землерийної техніки: Навчальний посібник* / Л.Є. Пелевін, А.В. Фомін, О.О. Костенюк, Г.І. Боковня – К.: КНУБА, 2006, 172 с.
2. *Визначення силових і енергетичних параметрів ґрунторуйнуючих робочих органів типу конусна фреза* / Фомін А.В., Костенюк О.О., Тетерятник О.А. – Зб. "Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини", вип.63. Респ. межвід. науково-технічн. Збірник. Київ, 2004, С. 3-15.
3. *Визначення параметрів ґрунторозробних робочих органів з урахуванням характеристик зруйнованого середовища і втомлювального руйнування* / Фомін А.В., Костенюк О.О., Тетерятник О.А., Боковня Г.І. – Зб. "Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини", вип.71. Респ. межвід. науково-технічн. Збірник. Київ, 2008, С. 20-23.
4. *Конструктивні характеристики високошвидкісних алмазних робочих органів конструкції КНУБА з урахуванням умов втомлюваного руйнування ґрунтів.* / Фомін А.В., Костенюк, О.О., Тетерятник О.А., Боковня Г.І. – Зб. "Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини", вип.74. Респ. межвід. науково-технічн. Збірник. Київ, 2009, С. 69-73.

Рецензент: О.М. Гаркавенко, к.т.н., доцент (КНУБА, Київ)

Отримано: 23.12.2010 р.