

## ЗАКОНОМІРНОСТІ НАВАНТАЖЕНЬ РОБОЧОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ РУСІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ДИНАМІЧНИХ ҐРУНТОРУЙНУЮЧИХ СИСТЕМ

*АННОТАЦІЯ.* Проведено аналіз взаємодії хвиль деформацій (напружень), що виникають від одиночних сколів елементів ґрунту, з власними коливаннями ґрунтового масиву. Отримано залежності для розрахунку кінематичних параметрів роботи динамічного робочого органа враховуючи коливальний характер напружень, що виникають в робочому середовищі.

*Ключові слова:* хвилі деформації, вимушені коливання, ударне руйнування, вібруюче робоче середовище, суперпозиція хвиль навантажень.

*АННОТАЦИЯ.* Проведен анализ взаимодействия волн деформаций (напряжений), которые возникают от одиночных сколов элементов грунта, с собственными колебаниями грунтового массива. Получены зависимости для расчета кинематических параметров работы динамического рабочего органа учитывая колебательный характер напряжений, которые возникают в рабочей среде.

*Ключевые слова:* волны деформаций, вынужденные колебания, ударное разрушение, вибрирующая рабочая среда, суперпозиция волн нагружений.

*SUMMARY.* The analysis of the interaction of deformations (stresses) that arise from single chips elements of soil, with the natural oscillations of the soil mass. The dependencies for the calculation of the kinematic parameters of the dynamic working organs given oscillatory stresses that occur in the environment.

*Key words:* waves strain forced vibrations, impact fracture, vibrating schaya working environment, the superposition wave loading.

---

### Вступ

Високошвидкісні робочі органи дуже широко застосовуються в сучасному будівництві, при руйнуванні міцних матеріалів та ґрунтів тощо. При розрахунках силових та енергетичних параметрів динамічних робочих органів враховуються зміна характеру взаємодії ріжучого елемента з середовищем, виникнення і розповсюдження в глибину ґрунту напружень від дії на межу масиву ріжучого елемента, що призводить до виникнення в ґрунтовому масиві напружено-деформованого стану, який має коливально-хвильовий характер.

Невирішеною проблемою в динамічному руйнуванні ґрунтів є поєднання хвиль від одиночних сколів (ударів) робочим органом елементів масиву і хвиль від власних коливань робочого середовища.

Крім того, конструктивні параметри ґрунторуйнівних робочих органів повинні враховувати не тільки динамічні параметри процесу руйнування, а і явища накопичення втомлювальних деформацій в робочому середовищі.

### Ціль і постановка задачі

Ціль роботи – встановлення закономірностей формування робочого процесу динамічного руйнування ґрунтів враховуючи взаємодію вимушених коливань від одиночних сколів ґрунту і власних коливань робочого середовища.

Задачею даного дослідження є визначення кінематичних параметрів взаємодії хвиль деформацій (напружень), що виникають при контакті різального елемента з робочим середовищем і власних коливань ґрунтового масиву.

### Виклад основного матеріалу

За динамічного навантаження робочого середовища в останньому виникають хвилі деформацій (напружень) і напружено-деформований стан середовища, що руйнується, має коливально-хвильовий характер. Таким чином формули, що описують процес руйнування ґрунтів технічними ґрунторуйнующими системами, повинні враховувати параметри хвильових процесів. Окрім

принципової відмінності динамічного руйнування ґрунтів від «статичного», а саме виникнення хвиль деформацій (напружень), також значно розширюється масив характеристик як робочого середовища, різальних елементів робочих органів, так і, власне, процесу взаємодії різальних елементів з ґрунтом, що впливають на руйнування робочих середовищ.

Одну із складових процесу динамічного руйнування робочих середовищ – поздовжню хвилю деформацій (напружень) необхідно характеризувати такими параметрами: амплітудою коливань  $A$  частинок ґрунту, напрямком яких співпадає з дотичною до траєкторії різання; швидкістю коливань частинок ґрунту  $V_k$ ; частотою коливань частинок ґрунту  $t$  та їх періодом  $T$ . Крім того важливою характеристикою процесу руху технічних ґрунторуйнуючих систем при руйнуванні ґрунтів є швидкість  $U$  розповсюдження поздовжніх хвиль деформацій (напружень) в робочому середовищі.

Різальний елемент динамічного робочого органа в процесі взаємодії з ґрунтом сколює ґрунт з величиною сколу, який знаходиться за формулою

$$l_{ск} = (hk_h - a)(ctg\delta + ctg\theta), \quad (1)$$

де  $h$  – глибина різання різальним елементом,  $k_h$  – коефіцієнт контакту зуба з ґрунтом залежно від кута різання  $\delta$ ;  $a = h(1 - k_{бок})$  – довжина бокових прорізів;

$\theta = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}$  – кут між траєкторією різання і переважним напрямком руху шматків стружки ґрунту;  $\rho$  – кут внутрішнього тертя (рис. 1).

В процесі формування різальним елементом окремого сколу будемо враховувати також той факт, що на формування даного сколу ґрунту чинять дію також процеси, які відбувалися при попередніх сколах цим елементом, як мінімум в одній лінії різання. Напруження при просуванні різального елемента в ґрунті навіть при формуванні одного сколу росте не лінійно, як за статичного різання, а коливально. Тобто на лі-

нійно зростаюче напруження, що обумовлене збільшенням площі контакту ґрунту з різальним елементом, накладаються коливання частинок ґрунту від попередніх сколів.

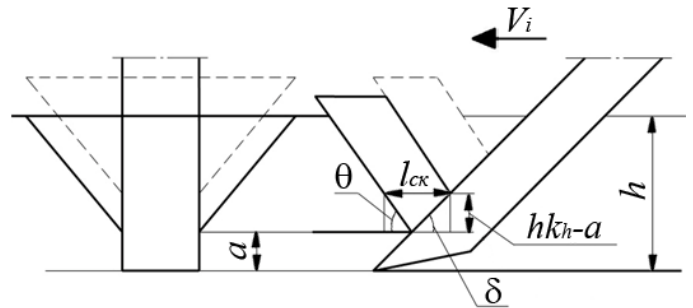


Рис.1. Схема сколу ґрунту різальним елементом

Важливою особливістю динамічного руйнування робочих середовищ є поєднання послідовного утворення і переміщення в ґрунті хвиль від одиничних сколів (ударів) ґрунту, тобто вимушених коливань і у проміжках між сколами утворення і переміщення хвиль від власних коливань робочого середовища. Тобто взагалі динамічне руйнування можна представити, як ударне руйнування ґрунту, що знаходиться у віброуючому стані.

Динамічне навантаження однорідного робочого середовища є суперпозицією таких процесів:

- хвильове навантаження від ударів (одиничних сколів ґрунту) при взаємодії робочих органів з масивом ґрунту;
- хвильове навантаження від власних коливань робочого середовища від хвилі, що розповсюджується вздовж позитивного напрямку осей і в зворотньому напрямку;
- коливальне навантаження від власних коливань часток ґрунту.

Напруження, що виникають в ґрунті від ударів (одиничних сколів) що призводять до хвиль деформації (напружень), знаходяться з виразу [1]

$$\sigma(x, t) = a \left( \frac{t}{x} \right)^{\nu-1} + b \left( \frac{t}{x} \right)^{2\nu} + c \left( \frac{t}{x} \right)^{\nu(1-R)} ; \quad (2)$$

$$a = \frac{\rho_0 \cdot v \cdot V_0^{v+1}}{v(R-1)}; \quad (3)$$

$$b = -\frac{\rho_0 \cdot V_0^{2(v+1)}}{1+R}; \quad (4)$$

$$c = \frac{\sigma_1 - a \cdot U^{1-v} - b \cdot U^{-2v}}{U^{v(R-1)}}, \quad (5)$$

тут  $\rho_0$  і  $\sigma_1$  – густина і напруження, що знаходяться за поверхнею однакових напружень;  $U$  – швидкість розповсюдження хвиль деформацій (напружень);  $V_0$  – швидкість взаємодії різальних елементів з робочим середовищем;  $v$  – стала, що визначає характер розповсюдження напружень (форму фронту хвилі) в робочому середовищі (за плоского руху  $v=0$ , за циліндричного руху  $v=1$ , за сферичного руху  $v=2$ );  $R$  – коефіцієнт бокового тиску.

Коефіцієнт бокового тиску характеризує відношення бокового  $\tau$  і нормального  $\sigma$  напружень в ґрунті. Для більшості класів ґрунтів на значному інтервалі тиску коефіцієнт  $R$  є величиною сталою ( $R = \text{const}$ ).

У випадку динамічного прикладання навантаження, тобто при дії на робоче середовище удару, вібрації, високошвидкісного різання коефіцієнт бокового тиску характеризує відношення напружень, що діють в напрямку, що перпендикулярний розповсюдженню хвиль деформацій (напружень), до напруження, що виникає в напрямку переміщення хвиль деформацій (напружень)

$$R = \frac{\tau}{\sigma}. \quad (6)$$

Розповсюдження хвиль від власних коливань робочого середовища описується хвильовим рівнянням [1]

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \frac{1}{U^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}, \quad (7)$$

тобто

$$\Delta \phi = \frac{1}{U^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}, \quad (8)$$

або

$$\square \phi = 0. \quad (9)$$

де  $\phi$  – скалярний потенціал поля зміщень  $S$  часток робочого середовища від положень їх рівноваги;  $x$ ,  $y$  і  $z$  – відповідні біжучі координати, що характеризують напрямки розповсюдження хвиль деформацій (напружень);  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $\square = \Delta - \frac{1}{U^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}$  – оператор Даламбера.

Для різального елемента (що являє собою простий клин) форма хвилі, що розповсюджується від власних коливань, буде мати плоску форму. Поздовжня хвиля у цьому разі теж буде мати плоску форму, тобто потенціал і інші величини, що характеризують власний хвильовий рух робочого середовища, буде залежати тільки від двох параметрів: часу  $t$  і однієї з просторових координат в напрямку якої розповсюджується хвиля (наприклад  $x$ ), тобто формула набуде вигляду [2]

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \frac{1}{U^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}. \quad (10)$$

Його загальний розв'язок можна представити наступним чином

$$\phi = f_1(Ut - x) + f_2(Ut + x), \quad (11)$$

де  $f_1$  і  $f_2$  – довільні функції, причому  $f_1(Ut - x)$  – потенціал для плоскої хвилі, що розповсюджується вздовж позитивного напрямку осі  $OX$ , яка співпадає з вектором швидкості взаємодії різального елемента з ґрунтом, а  $f_2(Ut + x)$  – потенціал для плоскої хвилі, що розповсюджується у протилежному напрямку.

Рівняння плоскої синусоїдальної хвилі (хвилі від власних коливань робочого середовища в першому наближенні можна вважати синусоїдальними), що розповсюджу-

ється вздовж позитивного напрямку осі  $ox$  має вигляд [3]

$$\varphi = a \sin(\omega t - kx + a_0), \quad (12)$$

а для хвилі, що розповсюджується в протилежному напрямку

$$\varphi = a \sin(\omega t + kx - a_0), \quad (13)$$

де  $a$  – початкова фреза коливань точок робочого середовища, що належить координатній площині  $uox$ ;  $k$  – хвильове число,  $\left(k = \frac{\omega}{u}\right)$ , тут  $\omega$  – циклічність (колова частота).

Величина тиску (напружень) хвилі від власних коливань визначається за формулою [3]

$$\sigma_{\text{вх}} = \rho u \ddot{x}, \quad (14)$$

де  $\rho$  – густина робочого середовища.

Колівальне навантаження робочого середовища від власних коливань частинок ґрунту характеризується також залежністю

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (15)$$

де  $A$  – амплітуда коливань частинок ґрунту;  $\omega$  – колова частота ( $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ );  $\varphi_0$  – початкова фаза.

Для власних коливань частинок ґрунту, що затухають

$$x = Ae^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (16)$$

де  $\delta$  – коефіцієнт затухання;  $Ae^{-\delta t}$  – миттєве значення амплітуди коливань частинок ґрунту;  $e$  – основа натуральних логарифмів

$$\delta = \frac{r}{2m}; \quad (17)$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}, \quad (18)$$

де  $r$  – коефіцієнт опору;  $m$  – приведена маса ґрунту.

$$\omega_0^2 = \frac{\kappa}{m}, \quad (19)$$

де  $\kappa$  – коефіцієнт пружної сили.

Відповідно

$$\kappa = \frac{\omega_0^2}{m}. \quad (20)$$

З іншого боку коефіцієнт опору визначається із залежності

$$\kappa = -\frac{F_{\text{тр}}}{\dot{x}}, \quad (21)$$

де  $F_{\text{тр}}$  – сила внутрішнього тертя робочого середовища (значок мінус означає, що вектори швидкості коливань і сили тертя мають протилежний напрямок).

Швидкість розповсюдження хвиль деформацій (напружень) знаходиться із формули

$$U = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}, \quad (22)$$

де  $E$  – динамічний модуль пружності робочого середовища;  $\rho$  – густина робочого середовища;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона, що характеризує властивості робочого середовища.

Від удару або одиночного сколу в робочому середовищі розповсюджується хвиля деформацій (напружень). Одночасно, при розповсюдженні цієї хвилі, збуджуються коливання все більш і більш віддалених від джерела коливань частинок робочого середовища.

Внаслідок розповсюдження хвилі  $i$ -та частинка ґрунту починає коліватися через час, що знаходиться за формулою

$$t_i = \frac{a(n_{i-1})}{U}, \quad (23)$$

де  $t_i$  – час, за який хвиля деформації напружень проходить від джерела коливань до  $n_{i-1}$ -ї частини;  $a$  – розмір частини, що залежить від гранулометричного складу середовища.

Таким чином вимушені хвилі розповсюджуються на значну відстань, що залежить від енергії удару, а власні хвилі і коливання затухають за час, що вимірюється порядком сотих і тисячних секунди, тому під час сколу загальне напруження, що виникає в ґрунті може бути дорівнювати сумі всіх напружень, тобто

$$\sum \sigma = \sigma_{\text{вм}} + \sigma_{\text{вх}} + \sigma_{\text{вк}}, \quad (24)$$

де  $\sigma_{\text{вм}}$  – напруження від вимушених коливань (одиначних сколів);  $\sigma_{\text{вх}}$  – напруження від власних коливань робочого середовища що збурюються хвилею деформацій;  $\sigma_{\text{вк}}$  – напруження від власних коливань часток ґрунту.

### Висновок

Під час роботи динамічного робочого органа процес руйнування ґрунту складається із одиничних ударів та одиничних сколів елементарних частинок ґрунту з великою частотою. При цьому в робочому середовищі розповсюджується хвиля деформацій (напружень). Одночасно, при розповсюдженні цієї хвилі, збуджуються коливання все більш і більш віддалених від джерела коливань частинок робочого середовища.

Враховуючи вищезазначене отримаємо, що вимушені хвилі розповсюджуються на значну відстань, що залежить від енергії удару, а власні хвилі і коливання затухають за час, що вимірюється порядком сотих і тисячних секунди.

Задачею подальших досліджень є визначення питомих значень енергії динамічного руйнування (потужності і щільності) робочих середовищ в умовах просторово-часового розподілення енергетичних потоків.

### Література

1. *Машины для специальных земляных работ. Учебное пособие* / Ю.А. Ветров, В.Л. Баладинский, – К.: Вища школа, 1980, 192 с.
2. *Справочник по физике* / Яворский Б.М. и Детлаф А.А. – М.: Издательство «Наука», 1968.– 940 с.
3. *Справочник по элементарной физике* / Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. – М.: Издательство «Наука», 1980.– 208 с.

*Рецензент:* К.І. Почка, к.т.н., доцент (КНУБА, Київ)

*Отримано:* 12.09.2012 р.