

## РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ УДАРНО-ВІБРАЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ҐРУНТІВ

Вінницький національний технічний університет

### *Анотація*

На основі аналізу існуючих моделей ґрунтів з урахуванням особливостей досліджуваного процесу пропонується наступна найпростіша модель ударно-вібраційного зондування ґрунтів.

**Ключові слова:** математична модель, моделювання, ударно-вібраційні процеси.

### *Abstract*

Based on the analysis of existing soil models, taking into account the peculiarities of the studied process, the following simplest model of shock-vibration sounding of soils is proposed.

**Keywords:** mathematical model, modeling, shock and vibration processes.

По верхньому кінцю зондувального снаряду (рис. 1, а), який складається з конуса і бурильних труб, періодично наносяться удари масою  $m$ . Частота ударів така, що перед кожним наступним ударом зондувальний снаряд знаходиться в стані спокою.

Вводяться наступні допущення:

- 1) Тіло масою  $m$  являється абсолютно твердим тілом.
- 2) Бурильна колона представляє собою ідеальну пружину з коефіцієнтом жорсткості  $C_1$ , маса якої розподілена між масами  $m$  і  $m_1$ .
- 3) Ґрунт моделюється пружнопластичним середовищем без в'язких опорів (тобто ідеальною пружиною з коефіцієнтом жорсткості  $C_2$  і постійно пластичною силою опору ґрунту  $F$ ).
- 4) Удар являється абсолютно непружним, тобто коефіцієнт відновлення  $R=0$ .
- 5) Хвильові явища, які проходять в бурильному стержні, не враховуються.

Максимальна деформація  $h$  ґрунту складається з пружної і пластичної складових, при цьому обидві являються остаточними, тобто представляють пружні деформації, а точніше деформації, спричинені силою, яка пропорційна переміщенню. Таким чином, описана модель процесу, маючи деякі схожі елементи, відрізняються від вже відомих моделей. Зокрема, по прийнятій тут схематизації ґрунту, деформації, пропорційні переміщенню, супроводжуються пластичними [1].

Введена пружність зондувального стержня, однак для спрощення з розгляду виключено випадок абсолютно пружного і не зовсім пружного удару. Маса ґрунту, яка приймає частину кінетичної енергії удару, також не враховується. Легко помітити, що представлену модель з повністю можна занести і до динамічного зондування ґрунтів.

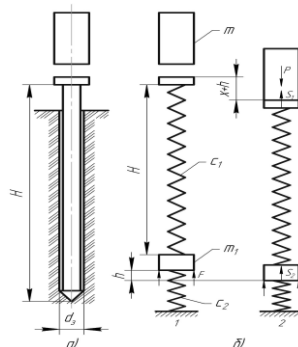


Рис.1. Найпростіша модель процесу ударно-вібраційного зондування ґрунтів: а – схема снаряду; б – пружно-пластична модель: 1 – до удару; 2 – після удару

В відповідності з прийнятими допущеннями на масу  $m_1$  в процесі її переміщення діють тільки постійні сили і сили, пропорційні переміщенню, тому для знаходження величини занурення зонду за удар можна скористуватися теоремою про зміну кінетичної енергії системи. В відповідності з цією теоремою записуємо наступну рівність:

$$\left(\frac{mv^2}{2}\right) - \left(\frac{mv_0^2}{2}\right) = \sum A_k, \quad (1)$$

де  $m$  – енергія ударної маси:  $v_0$ ,  $v$  – початкова та кінцева швидкість руху ударної маси ( $v=0$ );  $\sum A_k$  – сума роботи усіх зовнішніх і внутрішніх діючих на систему сил.

Сума роботи усіх сил описується рівняннями:

$$\sum A_k = A_1 + A_2 + A_3 + A_4; \quad (2)$$

$$A_1 = P \cdot (x + h); \quad (3)$$

$$A_2 = -C_1 \cdot x^2 / 2; \quad (4)$$

$$A_3 = -C_2 \cdot h^2 / 2; \quad (5)$$

$$A_4 = -F \cdot h, \quad (6)$$

де  $A_1$  – робота ваги  $P$  ударної маси і бурильного снаряду на переміщення  $x+h$ ;  $x$  – деформація пружини  $C_1$  (зондувального стержня);  $A_2$  – робота пружної сили пружини  $C_1$ ;  $A_3$  – робота пружної сили пружини  $C_2$ ;  $A_4$  – робота постійних опорів  $F$ .

Підставляючи вирази (3) – (6) в формулу (2), а потім в формулу (6) и враховуючи, що  $v=0$ , отримуємо:

$$\frac{-mv_0^2}{2} = P \cdot (x + h) - \frac{C_1 \cdot x^2}{2} - \frac{C_2 \cdot h^2}{2} - Fh, \quad (7)$$

а після перетворення:

$$\frac{mv_0^2}{2} + P \cdot (x + h) = \frac{C_1 \cdot x^2}{2} + \frac{C_2 \cdot h^2}{2} + Fh. \quad (8)$$

В лівій частині рівності (8) – кінетична енергія ударної маси і робота ваги, в правій – робота пружної деформації зондувального стержня, деформації ґрунту, визваною силою, пропорційної переміщенню, і робота пластичних опорів.

З умови рівності маси  $m_1$  під дією постійної сили, прикладеної до верхнього кінця пружини  $C_1$ , справедлива рівність:

$$C_1 \cdot x = C_2 \cdot h + F. \quad (9)$$

Нехтуючи масою  $m_1$  яка являється незначною, отримуємо:

$$x = \frac{C_2}{C_1} \cdot h + \frac{F}{C_1}. \quad (10)$$

Підставляючи формулу (10) в формулу (8), отримуємо:

$$mv_0^2 + 2 \cdot P \cdot \frac{C_2}{C_1} \cdot h + 2 \cdot P \cdot h = (C_2 \cdot h + F) \cdot \left( \frac{C_2}{C_1} \cdot h + \frac{F}{C_1} \right) + C_2 \cdot h^2 + 2 \cdot F \cdot h, \quad (11)$$

а після перетворення:

$$C_2 \cdot (C_1 + C_2) \cdot h^2 - 2 \cdot h \cdot (C_1 + C_2) \cdot (P - F) - [mv_0^2 \cdot C_1 - F(F - 2P)] = 0. \quad (12)$$

Розраховуючи рівняння (12) відносно  $h$ , отримуємо:

$$h = \frac{P - F}{C_2} + \sqrt{\frac{(P - F)^2}{C_2^2} + \frac{C_1 \cdot mv_0^2 + F \cdot (2P - F)}{C_2 \cdot (C_1 + C_2)}}. \quad (13)$$

В формулі (18) величина  $C_1$  представляє собою коефіцієнт жорсткості бурильного стержня. В процесі зондування ґрунтів довжина зондувального стержня змінюється і внаслідок цього змінюється його коефіцієнт жорсткості.

Представимо величину  $C_1$  виразом:

$$C_1 = C'_1 / H, \quad (14)$$

де  $C'_1$  – коефіцієнт жорсткості одиниці довжини фондованого стержня;  $H$  – довжина зондувального стержня.

Тоді вираз (13) можна записати в вигляді:

$$h = \frac{P - F}{C_2} + \sqrt{\frac{(P - F)^2}{C_2^2} + \frac{C'_1 \cdot mv_0^2 + HF \cdot (2P - F)}{C_2 \cdot (C'_1 + HC_2)}}. \quad (15)$$

Формула (20) дозволяє розраховувати величину занурюваного зонду за удар в залежності від вхідних в неї параметрів. Очевидно, що відома частота ударів  $n$  в одиницю часу, легко можна визначити швидкість занурення вібростержня по формулі:

$$v_g = n \cdot h. \quad (16)$$

Окремими випадками ударним забиванням зонду, які описуються виразом (15), являються наступні:

1) Пластичні опори ґрунту малі, тобто  $F = 0$ :

$$h = -\frac{P}{C_2} + \sqrt{\frac{P^2}{C_2^2} + \frac{C'_1 \cdot mv_0^2}{C_2 \cdot (C'_1 + HC_2)}}. \quad (17)$$

2) Вага ударної маси і зондувального стержня в порівнянні з пластичними і пружними опорами ґрунту мала, тобто  $P = 0$ :

$$h = -\frac{F}{C_2} + \sqrt{\frac{F^2}{C_2^2} + \frac{C'_1 \cdot mv_0^2 - HF^2}{C_2 \cdot (C'_1 + HC_2)}}. \quad (18)$$

3) Пластичні опори ґрунту незначні, вага ударної маси і зондувального стержня також малі, тобто  $F = 0$  і  $P = 0$ :

$$h = v_0 \sqrt{\frac{C_1' \cdot m}{C_2 \cdot (C_1' + HC_2)}}. \quad (19)$$

4) Пружними властивостями ґрунт практично не володіє, тобто  $C_2 = 0$ . Для визначення  $h$  в цьому випадку необхідно скористуватися виразом (17), тоді:

$$h = \frac{-mv_0^2 \cdot C_1' - HF(2P - F)}{2C_1'(P - F)}. \quad (20)$$

Вираз (20) справедливий при  $F > P$ .

Розглядувана модель дозволяє також отримати критерій нормального занурення і максимальної довжини  $H$  зондувального стержня, при якому процес занурення (для заданих параметрів) призупиняється [2,3,4,5,6].

З виразу (12) легко встановити, що процес занурення не буде відбуватися:

При  $P \neq 0$

$$-mv_0^2 \leq [(F^2 - 2PF)/C_1]; \quad (21)$$

При  $P = 0$

$$mv_0^2 \leq F^2/C_1. \quad (22)$$

Значення  $H_{max}$ , при якому процес занурення призупиниться, можна визначити за формулами:

При  $P \neq 0$

$$H_{max} = [(mv_0^2 \cdot C_1')/(F^2 - 2PF)], \quad (23)$$

При  $P = 0$

$$H_{max} = [(mv_0^2 \cdot C_1')/F^2]. \quad (24)$$

Цікаво замітити, що максимальна довжина снаряду, при якій зонд не буде занурюватися в ґрунт, не залежить від опору ґрунту, пропорційного переміщенню, тобто від  $C_2$  [7].

Величина початкового занурення зонду за удар, що відповідає випадку, коли  $H = 0$ , при нехтуванні ваги ударної маси і зонду визначається за формулою:

$$h = -\frac{F}{C_2} + \sqrt{\frac{F^2}{C_2} + \frac{mv^2}{C_2}}. \quad (25)$$

Отримані формули, при усій їх простоті дозволяють впритул підійти до питання про інтерпретації даних ударного та УДВ зондування ґрунтів.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Афанасьев И.С. Бурение скважин при разведке месторождений строительных материалов. Л.: Нера, 1980. – 132 с.

2. Калинин А.Г. Разведочное бурение: Учеб. для вузов / Калинин А.Г., Ошкордин О.В., Питерский В.М., Соловьев Н.В. М.: ООО “Недра-Бизнесцентр”. – 2000. – 748 с.
3. Соловьев Н.В. Бурение разведочных скважин: Учеб. для вузов / Соловьев Н.В., Кривошеев В.В., Башкатов Д.Н. и др. // М.: Высш. Школа. – 2007. – 904 с.
4. Искович-Лотоцкий Р.Д. Машины вибрационного и виброударного действия / Искович-Лотоцкий Р.Д., Матвеев И.Б., Крат В.А. // Київ, “Техніка”. – 1982. – 207 с.
5. Искович – Лотоцкий Р.Д. Процеси та машини вібраційних і віброударних технологій. Монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006 -291 с.
6. Искович-Лотоцкий Р.Д., Івашко Є.І. Гідромолот з будованим вібробуджувачем . Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали тез доповідей XXI міжнародної науково-технічної конференції (24-27 травня 2016 р., м. Київ). – Київ: КПІ, 2016.
7. Искович-Лотоцкий Р.Д. Експериментальний стенд для дослідження гідроімпульсного провoda вібромолота для зондування ґрунтів. Гідро- та мпневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування: матеріали тез доповідей міжнародної науково-технічної конференції (15-30 листопада 2016 р., м. Вінниця). Вінниця: ВНТУ, 2016.

**Искович-Лотоцкий Ростислав Дмитрович** – докт. техн. наук, професор кафедри галузевого машинобудування, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: shevchenkovasia777@gmail.com.

**Василь Васильович Шевченко** — студент групи ІГМ-21м, факультет машинобудування та транспорту, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: shevchenkovasia777@gmail.com.

**Rostislav Iskovich-Lototsky D.** – Dr. Techn. Sc., Prof., Professor of Industrial Engineering Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: shevchenkovasia777@gmail.com.

**Shevchenko Vasyl V.** — Student of the Faculty of Mechanical Engineering and Transport, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: shevchenkovasia777@gmail.com.