

*В.В. Кованько, д.т.н, професор, О.В. Кованько, аспірант  
(Національний університет водного господарства та природокористування, Україна)  
О.І. Осоловський, к.т.н., доцент кафедри  
(Національний авіаційний університет, Україна)*

## **ОЦІНКА ЕНЕРГОПОГЛИНАЮЧОЇ ЗДАТНОСТІ РЕГОЛІТУ МІСЯЦЯ НА ОСНОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДЕФОРМУВАННЯ ГРУНТІВ-АНАЛОГІВ**

*Наведено результати експериментальних досліджень енергопоглинання одиниці об'єму аналога реголіту Місяця при його ущільненні в процесі навантаження і розвантаження, що дозволяє отримати аналітичні залежності переходу від параметрів моделі до параметрів оригіналу.*

У зв'язку з появою технічної можливості і економічної доцільності освоєння Місяця, експлуатації його сировинного і енергетичного потенціалу та організації широкого спектру космічних технологій, все чіткіше вимальовуються контури задач створення принципово нових енергоощадних машин, механізмів та роботів різного призначення, здатних функціонувати у відмінних від земних фізичних умовах. Це вимагає отримання різнопланової інформації щодо оцінки інженерно-будівельних властивостей реголіту, дослідження систем «реголіт-рушій» та «реголіт-робочий орган», що для позаземного машинобудування, яке тільки зароджується, має велике наукове і практичне значення.

Для оцінки енергопоглинаючої здатності моделей реголіта з метою подальшого врахування її при прогнозуванні необхідного енергоресурсу різних механізмів і машин для умов Місяця, нами розроблено пристрій, конструктивна схема якого наведена на рис. 1.

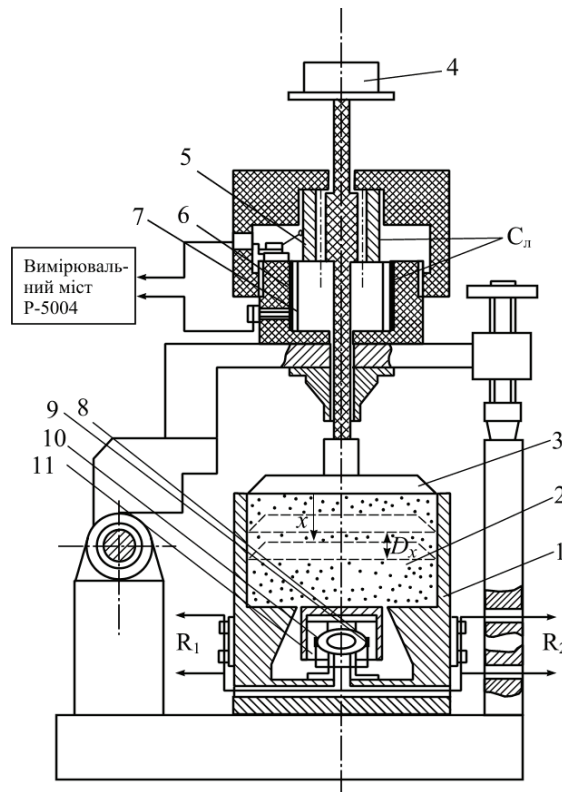


Рис.1. Конструктивна схема пристрою для дослідження енергопоглинаючої здатності аналогів реголіту при ущільненні у замкнутому об'ємі

Пристрій складається із камери 1, в якій розміщено ґрунт-аналог 2, що деформується глясованим, легко ковзаючим поршнем 3 під дією навантаження 4. В якості моделі реголіта було використано дрібнозернистий кварцовий пісок з відносною вологістю 2,45% [1-3]. Циліндричний ємнісний перетворювач  $C_A$ , служить для перетворення переміщення  $x$  поршня у відповідну величину електричної ємності, яка визначається довжиною  $l_p$  перекриття його обкладок – рухомої 5 та нерухомої 6 ( $x=l_p$ ). Останні розділені між собою слюдяним ізолятором 7, що послаблює вплив зміни температури та вологості навколишнього середовища на точність вимірювань. Вихідне положення обкладок перетворювача  $C_A$  відповідає початковому значенню його електричної ємності, що приймається за нульове, а при максимальному ході поршня 3 (50мм) ця ємність збільшується до 150 пФ. В якості вторинного вимірювального приладу, застосовано високочастотний вимірювальний міст (наприклад Р-5004).

Тиск всередині зразка аналога реголіта визначався за допомогою вимірювального вузла, який складається з пружного кільцеподібного елемента 8, зафіксованого у циліндричному стакані 11, на якому закріплено тензорезистори 9 ( $R_1$ ) та 10 ( $R_2$ ).

Довжина переміщення  $x$  визначалась через величину електричної ємності  $C_{xi}$  перетворювача  $C_A$

$$x = \frac{C_{xi} \lg \frac{D_{n2}}{D_{n1}}}{0,241 \varepsilon}, \quad (1)$$

де  $\varepsilon$  - діелектрична проникливість слюдяного ізолятора 7;  $D_{n2}$  - внутрішній діаметр зовнішньої обкладки 6;  $D_{n1}$  - зовнішній діаметр внутрішньої обкладки 5.

Оскільки щільність  $\rho$  зразка ґрунту дорівнює  $m_r/V_r$ , де  $m_r$  - маса ґрунту в камері 1, а  $V_r$  - об'єм цього ґрунту і  $V_r = V_0 - S_0 \cdot x = S_0(H_0 - x)$ , де  $V_0$  - початковий об'єм ґрунту в недеформованому стані,  $H_0$  - початкова висота маси ґрунту в камері ( $H_0 = 100$  мм),  $S_0$  - площа основи камери, яка приблизно дорівнює площі поршня ( $S_0 = 28,26 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ), то

$$\rho = \frac{\frac{m_r}{V_0}}{\frac{V_0 - S_0 x}{V_0}} = \frac{\rho_0}{1 - \frac{x}{H_0}}, \quad (2)$$

де  $\rho_0$  - щільність зразка в недеформованому стані ( $\rho_0 = 1,452 \text{ г/см}^3$ ).

Підставивши у (2) замість  $x$  його значення із (1), отримаємо, що величина  $\rho$  (кінцеве значення якої становить,  $1,502 \text{ г/см}^3$ ) визначається по величині  $C_{xi}$

$$\rho = \frac{0,241 \varepsilon \rho_0 H_0}{0,241 H_0 \varepsilon - C_{xi} \lg \frac{D_{n2}}{D_{n1}}}. \quad (3)$$

Із (2) знайдемо, що

$$x = H_0 \left( 1 - \frac{\rho_0}{\rho} \right). \quad (4)$$

За результатами проведених досліджень були отримані дані, представлені на рис.2, де по осі абсцис відкладено деформацію  $x$  ґрунту, а по осі ординат – тиск  $p$ .

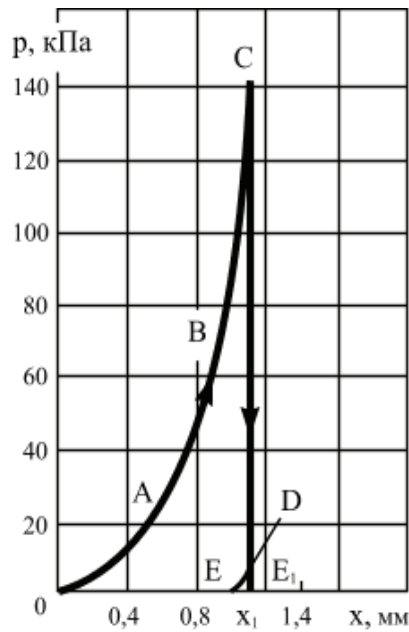


Рис.2. Залежність деформації  $x$  кварцового піску від тиску  $p$  при навантаженні та розвантаженні

Як видно із рис.2, при навантаженні (ущільненні) зразка, отримується крива OABC, а при розвантаженні – друга крива CDE, яка є майже вертикальною і не співпадає з кривою навантаження.

Апроксимація кривої навантаження дозволила отримати залежність

$$p = a(e^{bx} - 1), \quad (5)$$

де  $a = 2,91 \text{ кПа}$ ;  $b = 3,56 \text{ м}^{-1}$ .

Якщо через  $\bar{s}$  позначити площу поршня, що діє на модель реголіта, то елементарна робота  $dA_c$ , яка йде на його стискання визначиться як

$$dA_c = \bar{p} dx \quad (6)$$

де  $dx$  - елементарна довжина переміщення поршня.

Підставивши значення  $p$  із (5) в (6) і проінтегрувавши вираз отримаємо

$$A_c = \frac{\bar{a}s}{b} (e^{bx} - bx - 1) \quad (7)$$

Робота  $A_c$ , в загальному випадку, витрачається на ущільнення (стискання) ґрунту, додання його деякої пружності і внутрішнього тертя ґрунтових частинок.

Із аналізу рис.2 випливає, що площа  $EDE_1E$  представляє собою ту частину витраченої на деформацію роботи  $A_0$  зовнішніх сил, яка перейшла у форму потенціальної енергії стиснутого зразка кварцового піску. При зворотному ході поршня вона проявляє себе перетворенням в механічну роботу сил, що діють на поршень. Іншими словами на відрізок  $E_1E$  поршень рухається під дією зразка ґрунту, у якого проявились пружні властивості.

Отже, можна прийняти, що робота  $A_0$ , яка перейшла у форму потенціальної енергії стиснутого зразка ґрунту визначиться як

$$A_0 = \eta^* A_c, \quad (8)$$

де  $\eta^*$  - коефіцієнт, який дорівнює відношенню площ  $EDE_1E$  та  $OABCDE_1O$  ( $\eta^* \approx 0,002$ ).

Із наведеного випливає, що робота  $A_c$ , яка витрачається зовнішніми силами на

стискання зразків ґрунту може бути представлена сумою робіт, а саме роботою  $A_y$ , що іде на ущільнення ґрунту (зближення між собою його частинок, руйнування пор і витискування повітря) та роботою  $A_0$ , що переходить у потенціальну енергію контактуючих між собою частинок за рахунок безпосередньої взаємодії між ними (деформації їхніх поверхонь).

$$A_c = A_y + A_0 \quad (9)$$

Звідси можна знайти, що

$$A_y = A_c - A_0 = A_c(1 - \eta^*) = \frac{a\bar{s}}{b} (e^{bx} - bx - 1)(1 - \eta^*). \quad (10)$$

Вираз (10) може бути представлений через щільність

$$A_y = \frac{a\bar{s}}{b} \left[ e^{bH(1-\frac{\rho_0}{\rho})} - bH(1-\frac{\rho_0}{\rho}) - 1 \right] (1 - \eta^*), \quad (11)$$

де  $H$  – кінцева висота зразка при його деформуванні.

Якщо визначену з допомогою (11) роботу  $A_y$  поділити на початковий об'єм недеформованого зразка, то можна отримати питому роботу  $U$  ( $U = 0,0539 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^3}$ ), що витрачається на ущільнення одиниці його об'єму.

### Висновки

Результати роботи вказують на наявність квазіпружних властивостей досліджуваного аналога реголіта, що необхідно враховувати при моделюванні систем «реголіт-робочий орган» та «реголіт-рушій» з метою отримання раціональних конструкцій машин та механізмів, пристосованих до умов експлуатації на поверхні Місяця.

### Список літератури:

1. *В.В. Кованько, Н.Г. Лусюк, А.А. Комісарчук* Свойства лунного ґрунта и проблемы его разработки / Под ред. В.В. Кованько. – Львів.: «Евросвіт», 1998. – 180 с.
2. *И.И. Черкасов, В.В. Шварёв* Начало ґрунтоведения Луны. – Москва: Наука, 1971. – 180 с.
3. *И.И. Черкасов, В.В. Шварёв* Ґрунт Луны. – Москва: Наука, 1975. – 190 с.