

## THE APPLICATION OF SHASHENKO'S CRITERION FOR FORECASTING THE STRENGTH OF SANDY LOAM SOILS

V. Shapoval<sup>1\*</sup>, O. Pashchenko<sup>1</sup>, R. Tereshchuk<sup>1</sup>, S. Zhilinska<sup>1</sup>, P. Protsenko<sup>2</sup>, I. Ponomarenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>National Technical University Dnipro Polytechnic, Dnipro, Ukraine

<sup>2</sup>Lviv Polytechnic National University, L'viv, Ukraine

<sup>3</sup>Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

\*Corresponding author: [shapoval.v.h@nmu.one](mailto:shapoval.v.h@nmu.one)

**Abstract.** It is known that the dependence of the strength of clay soils in general and sandy soil in particular on the vertical pressure acting on them has a curvilinear shape (i.e. their strength properties are physically nonlinear). At the same time, the linear criterion of Coulomb-Mora strength is currently used to predict the strength and stability of soil foundations and structures. This leads to insufficiently accurate accounting of soil properties, which, in turn, does not allow to adequately predict the destruction and loss of stability of soil foundations and structures.

When writing this work, the aim was to assess the suitability of O.Shashenko's strength criterion for taking into account the physical nonlinearity of sandy soils. For this purpose theoretical researches of geomechanical processes with use of analytical and numerical mathematical methods were applied, and also the analysis and generalization of results of theoretical researches is carried out.

As a result, it is shown that in the field of change of experimental data the O.Shashenko strength criterion allows to describe soil strength properties more accurately than the Coulomb - Mora criterion. It was found that when extrapolating the curves to the region of low pressures, the Coulomb-Mora strength criterion is the best.

Thus, for the first time with the use of specific experimental data, the question of using the strength criterion of O.Shashenko to take into account the physical nonlinearity of the strength characteristics of sandy soil properties was investigated. Our results allow us to reasonably apply the criterion of strength O.Shashenko to take into account the nonlinear properties of sandy soil.

**Keywords:** strength criterion, single-plane shear, strength, consolidated shear, soil.

## ДО ПИТАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ КРИТЕРІЮ О.ШАШЕНКО ДЛЯ ПРОГНОЗУ МІЦНОСТІ СУПІЩАНИХ ҐРУНТІВ

В.Шаповал<sup>1\*</sup>, О.Пащенко<sup>1</sup>, Р.Терещук<sup>1</sup>, С.Жилінська<sup>1\*</sup>, П.Проценко<sup>2</sup>, І.Пономаренко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет «Дніпропетровська політехніка», Дніпро, Україна

<sup>2</sup>Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

<sup>3</sup>Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

\*Відповідальний автор: [shapoval.v.h@nmu.one](mailto:shapoval.v.h@nmu.one)

**Анотація.** Відомо, що залежність міцності глинистих ґрунтів в загальному і супіщаного ґрунту зокрема від чинного на них вертикального тиску має криволінійний вид (тобто їх властивість міцності є фізично нелінійними). При цьому в даний час при прогнозі міцності і стійкості ґрунтових підстав і споруд використовують лінійний критерій міцності Кулона - Мора. Це призводить до недостатньо точного обліку властивостей ґрунту що, в свою чергу, не дозволяє адекватно прогнозувати руйнування і втрату стійкості ґрунтових підстав і споруд.

При написанні цієї роботи переслідувалася мета оцінити, наскільки підходить для врахування фізичної нелінійності супіщаних ґрунтів критерій міцності О.Шашенко. Для цього були застосовані теоретичні дослідження геомеханічних процесів з використанням аналітичних і чисельних математичних методів, а також проведено аналіз і узагальнення результатів теоретичних досліджень.

В результаті показано, що в області зміни експериментальних даних критерій міцності О.Шашенко дозволяє більш точно, ніж критерій Кулона - Мора описати властивості міцності ґрунту. При цьому встановлено, що при екстраполяції кривих в область малих тисків найкращим є критерій міцності Кулона - Мора.

Таким чином, вперше з використанням конкретних експериментальних даних досліджено питання про використання критерію міцності О.М.Шашенко для врахування фізичної нелінійності характеристик міцності властивостей супіщаного ґрунту. Отримані нами результати дозволяють обґрунтовано застосовувати критерій міцності О.Шашенко для обліку нелінійних властивостей супіщаного ґрунту.

**Ключові слова:** критерій міцності, одноплщиний зсув, міцність, консолидоване зрушення, ґрунт.

## 1. Вступ

### Аналіз досягнень в цій галузі.

Відомо, що експериментальні залежності «руйнівне дотичне напруження - вертикальне навантаження» мають вигляд криволінійної лінії, яку іноді називають обвідною Кулона - Мора. Згідно даних М.О.Цитовіча при нульовому вертикальному навантаженні на зразок, руйнуюче дотичне напруження в глинистих ґрунтах також дорівнює нулю. При цьому критерій міцності Кулона - Мора дає в цій точці значення руйнівне дотичне напруження, рівне питомому зчепленню (тобто відмінне від нуля; рис. 1) [1, 2]. Це, в свою чергу, призводить до завищення утримуючих сил при розрахунку стійкості і міцності ґрунтових основ і споруд.

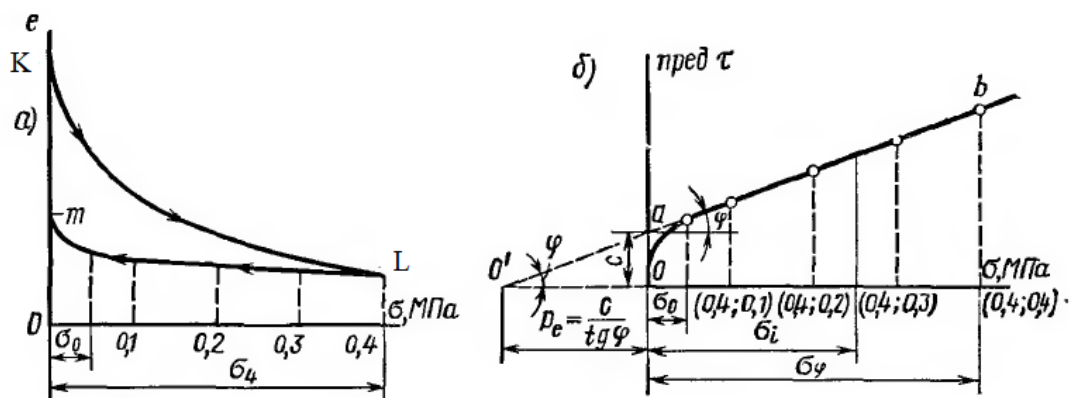


Рисунок 1 - Криві граничних опорів зрушенню зв'язаних глинистих ґрунтів в умовах відкритої системи (консолидовано - дренажних; дані М.О.Цитовіч).

а - залежності пористості ґрунту від навантаження (крива KL) і розвантаження (крива mL);  
б - крива зсуву

В результаті аналізу було зроблено висновок про те, що проблема обліку фізичної нелінійності характеристик міцності властивостей глинистих ґрунтів актуальна, а одним із шляхів її вирішення є використання широко відомого в механіці гірських порід критерію міцності О.Шашенко [3, 4].

**Матеріали і методика досліджень.** Завдання досліджень було сформульовано так:

1. Відомі експериментальні результати консолидовано - дренажних випробувань супіщаного ґрунту в приладі одноплщинного зсуву.

2. Необхідно:

2.1. Виконати апроксимацію експериментальних даних з використанням лінійної залежності (критерій міцності Кулона - Мора).

2.2. Виконати апроксимацію експериментальних даних з використанням нелінійної залежності (критерій міцності О.Шашенко).

2.3. З використанням відносної середньоквадратичної похибки виконати оцінку точності апроксимації.

2.4. Виконати екстраполяцію результатів апроксимації в область малих тисків.

Для визначення властивостей ґрунту і його класифікації нами були використані рекомендації [4, 5]. Фізичні властивості випробуваною нами супісє представлено в таблиці 1.

Міцність ґрунту визначалася відповідно до рекомендацій [6].

Результати визначення міцності ґрунту при його природної вологості представлені в таблиці 2.

Результати випробувань повністю водонасиченого ґрунту представлені в таблиці 3.

Аналіз представлених в таблиці 1 даних дозволив нам зробити висновок про те, що властивості випробуваного нами супіщаного ґрунту є типовими для Придніпровського регіону.

Для визначення матеріальних констант критерію міцності Кулона - Мора, нами була використана загальноприйнята методика [7], рівняння має вигляд:

$$\tau = \sigma \cdot tg(\varphi) + c, \quad (1)$$

де  $\tau$  - руйнуюче дотичне напруження;  $\sigma$  - вертикальне навантаження на ґрунтовий зразок,  $\varphi$  і  $c$  - матеріальні константи що підлягають визначенню (відповідно кут внутрішнього тертя і питоме зчеплення) критерію міцності Кулона - Мора.

При цьому для визначення матеріальних констант критерію міцності О.Шашенко, нами була використана методика, викладена в [8], рівняння має вигляд:

$$\tau = \sqrt{\sigma \cdot c \cdot tg(\varphi) + c^2}, \quad (2)$$

де  $\tau$  - руйнуюче дотичне напруження;  $\sigma$  - вертикальне навантаження на ґрунтовий зразок,  $\varphi$  і  $c$  - підлягають визначенню матеріальні константи критерію міцності О.Шашенко.

Виявилось, що залежність міцності ґрунту від вертикального тиску на зразок в рамках критерію міцності Кулона - Мора має вигляд:

$$\tau = \sigma \cdot 0,4793 + 0,0512, \quad (3)$$

де  $tg(\varphi) = 0,4793$ , звідки  $\varphi = 25,61$  градуси і  $c = 0,0512$  МПа.

Таблиця 1 - Фізичні властивості супіщаного ґрунту.

| ІГЕ № 3. Супіски палево-жовті і жовті               |                         |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Характеристика                                      | Значення характеристики |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Лабораторний номер                                  | 1                       | 2      | 3      | 4      | 8      | 10     | 11     | 12     | 14     |
| Виробка і її номер                                  | св. 20                  | св. 20 | св. 20 | св. 20 | св. 20 | св. 20 | св. 20 | св. 20 | св. 20 |
| Глибина відбору проби, м                            | 8,20                    | 8,60   | 9,0    | 9,4    | 17,0   | 19,0   | 20,0   | 21,0   | 30,0   |
| Вологість на межі текучості, д.од.                  | 0,19                    | 0,19   | 0,23   | 0,21   | 0,19   | 0,21   | 0,20   | 0,18   | 0,20   |
| Вологість на межі розкатування, д.од.               | 0,16                    | 0,16   | 0,17   | 0,17   | 0,15   | 0,17   | 0,16   | 0,15   | 0,15   |
| Число пластичності, д.од.                           | 0,03                    | 0,03   | 0,06   | 0,04   | 0,04   | 0,04   | 0,04   | 0,03   | 0,05   |
| Вологість природна, д.од.                           | 0,04                    | 0,04   | 0,06   | 0,04   | 0,06   | 0,09   | 0,14   | 0,09   | 0,12   |
| Вологість водонасичення, д.од.                      | 0,23                    | 0,25   | 0,27   | 0,27   | 0,24   | 0,20   | 0,20   | 0,16   | 0,17   |
| Показник текучості, д.од.                           | -4                      | -4     | -1,83  | -3,25  | -2,25  | -2,00  | -0,50  | -2,00  | -0,60  |
| Щільність частинок ґрунту, г/см <sup>3</sup>        | 2,67                    | 2,67   | 2,61   | 2,67   | 2,67   | 2,67   | 2,67   | 2,67   | 2,67   |
| Щільність ґрунту, г / см <sup>3</sup>               | 1,68                    | 1,63   | 1,68   | 1,58   | 1,70   | 1,85   | 1,94   | 2,00   | 2,03   |
| Щільність сухого ґрунту, г / см <sup>3</sup>        | 1,62                    | 1,57   | 1,52   | 1,52   | 1,60   | 1,70   | 1,70   | 1,83   | 1,81   |
| Пористість, д.од.                                   | 0,39                    | 0,41   | 0,43   | 0,43   | 0,40   | 0,36   | 0,36   | 0,31   | 0,32   |
| Коефіцієнт пористості в природному складанні, д.од. | 0,65                    | 0,70   | 0,76   | 0,76   | 0,66   | 0,57   | 0,57   | 0,46   | 0,47   |
| Ступінь вологості, д.од.                            | 0,16                    | 0,15   | 0,21   | 0,14   | 0,24   | 0,42   | 0,66   | 0,53   | 0,68   |
| Недолік водонасичення, д.од.                        | 0,19                    | 0,21   | 0,21   | 0,23   | 0,18   | 0,11   | 0,06   | 0,07   | 0,05   |

Таблиця 2 - Результати випробувань супіщаного ґрунту природної вологості в приладі одноплощинного зсуву

| ІГЕ № 3. Супіски палево-жовті і жовті                                  |                                    |       |       |   |       |       |       |       |       |
|--|------------------------------------|-------|-------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Опір зрізу зразка в природному стані (зсув консолидований)             |                                    |       |       |   |       |       |       |       |       |
| Вертикальне навантаження $\sigma$ , МПа                                | Руйнівне навантаження $\tau$ , МПа |       |       |   |       |       |       |       |       |
| 0,200  | -                                  | 0,132 | 0,163 | - | 0,148 | 0,128 | 0,123 | 0,148 | 0,145 |
| 0,400  | -                                  | 0,252 | 0,275 | - | 0,265 | 0,225 | 0,234 | 0,265 | 0,269 |
| 0,600  | -                                  | 0,350 | 0,271 | - | 0,361 | 0,313 | 0,323 | 0,359 | 0,352 |
| Значення міцності (стандартна методика; критерій міцності Кулона-Мора) |                                    |       |       |   |       |       |       |       |       |
| Кут внутрішнього тертя $\varphi$ , градуси                             | -                                  | 29    | 27    | - | 28    | 25    | 27    | 28    | 27    |
| Питоме зчеплення $c$ , МПа   | -                                  | 0,027 | 0,062 | - | 0,045 | 0,037 | 0,027 | 0,026 | 0,048 |

При цьому виявилось, що залежність міцності ґрунту від вертикального тиску на зразок в рамках критерію міцності О.Шашенко має вигляд:

$$\tau = \sqrt{\sigma \cdot 0,2289 - 0,0259}, \quad (4)$$

де  $c^2 = -0,0259$ , звідки  $c = \pm 0,161 \cdot i$  МПа;  $tg(\varphi) = \mp 1,422 \cdot i$ , звідки  $\varphi = \mp (90 + 50,04 \cdot i)$ . тут  $i = \sqrt{-1}$  - уявна одиниця [9].

Отримані нами значення матеріальних констант, що входять в критерій міцності О.Шашенко, є або уявними (питоме зчеплення) або комплексними (кут внутрішнього тертя) числами.

Результати апроксимації залежностей «руйнівне навантаження - вертикальне навантаження на зразок» представлені на рисунку 2.

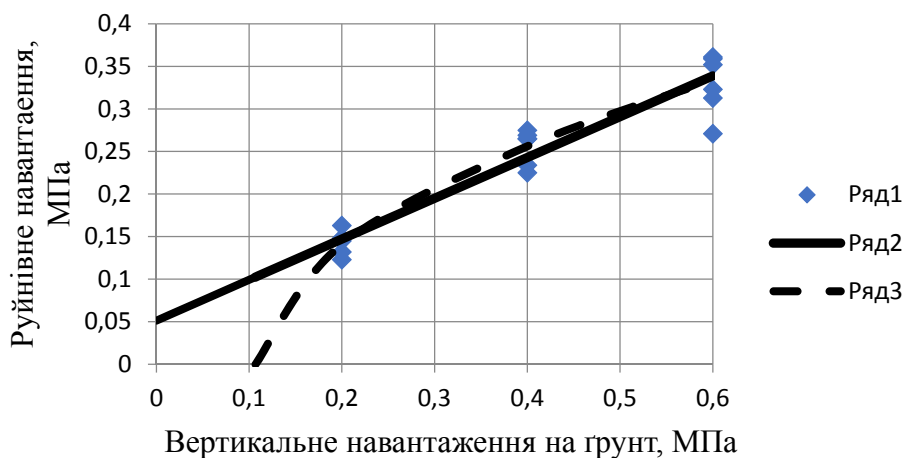


Рисунок 2 - Результати визначення кривих «руйнівне навантаження - вертикальний тиск на зразок».

Ряд 1 - експеримент; ряд 2 - критерій міцності Кулона - Мора; 3 - критерій міцності О.Шашенко.

Для оцінки відповідності розрахованих критеріїв міцності експериментальним даним було знайдено середньо квадратичну похибку:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{n} \left( \frac{\tau_e - \tau_p}{\tau_e} \right)^2}, \quad (5)$$

де  $\varepsilon$  - відносна середня квадратична похибка між експериментальними ( $\tau_{e,i}$ ) і розрахованими ( $\tau_{p,i}$ ) значеннями руйнуючих дотичних напружень;  $i$  - номер випробування;  $n$  - загальне число випробувань.

Виявилось, що в разі критерію міцності Кулона - Мора  $\varepsilon = 0,101$ , а в разі критерію О.Шашенко  $\varepsilon = 0,094$ . На цій основі було зроблено висновок про те, що в області зміни

експериментальних даних ( $\sigma \in \{2,0 \dots 6,0\}$  МПа) більш точним є критерій міцності О.Шашенко.

Далі була виконана екстраполяція критеріїв міцності в область малих тисків (рис. 2). Виявилось, що при вертикальному навантаженні, меншому за 0,1 МПа критерій міцності О.Шашенко дає нам негативні значення руйнівного навантаження, що суперечить сучасним уявленням про природу руйнування ґрунтів і гірських порід.

У зв'язку з цим на інтервалі тисків ( $\sigma \in \{0,0 \dots 6,0\}$  МПа) критерій міцності О.Шашенко має бути поданий у вигляді:

$$\tau = \begin{cases} 0 & \text{при } \sigma \leq 0,113; \\ \sqrt{\sigma \cdot 0,2289 - 0,0259} & \text{при } \sigma > 0,113. \end{cases} \quad (6)$$

В ході подальшого аналізу нами було виконано співставлення залежностей кута внутрішнього тертя (рис. 3) і питомого зчеплення (рис. 4) від тиску на ґрунт.

Для визначення «дотичних» кута внутрішнього тертя і питомого зчеплення в точці з поточною координатою « $\sigma$ » були використані формули:

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \arctg \left\{ \frac{\partial \tau}{\partial \sigma} \right\}; \\ c &= \tau - \sigma \cdot \frac{\partial \tau}{\partial \sigma}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

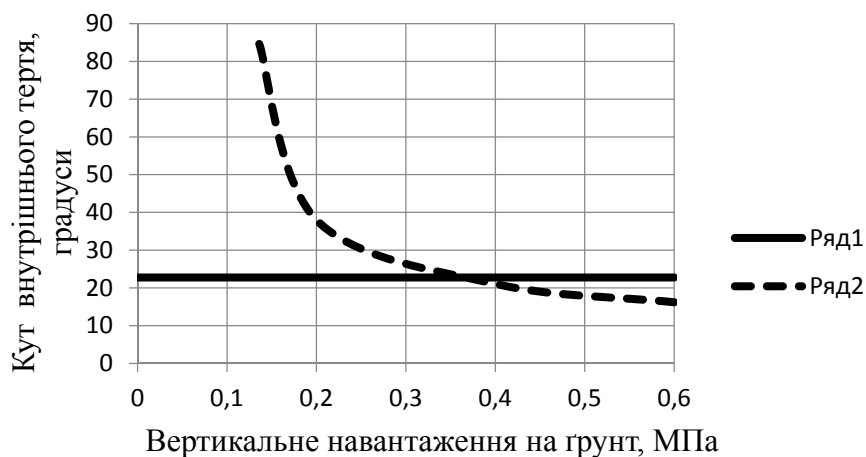


Рисунок 3 - Результати визначення кривих «кут внутрішнього тертя - вертикальний тиск на зразок».

Ряд 1 - критерій міцності Кулона - Мора; 2 - критерій міцності О.Шашенко.

З рисунка 3 випливає, що встановлений в рамках критерію міцності Кулона - Мора кут внутрішнього тертя не залежить від тиску на ґрунт.

При цьому розрахований в рамках критерію міцності «дотичний» кут внутрішнього тертя залежить від нормального тиску на ґрунт. У цьому випадку має місце чітка тенденція зменшення кута внутрішнього тертя при зростанні навантаження на ґрунт.

З рисунка 4 випливає, що встановлене в рамках критерію міцності Кулона - Мора питоме зчеплення не залежить від тиску на ґрунт.

При цьому розраховане в рамках критерію міцності «дотичне» питоме зчеплення залежить від нормального тиску на ґрунт. У цьому випадку має місце чітка тенденція зростання питомої зчеплення при зростанні навантаження на ґрунт.

Слід також зазначити, що в розглянутому випадку отримані з використанням критерію міцності О.Шашенко, результати мають гарну відповідність сучасним уявленням про руйнування ґрунтів при зсуві в області зміни експериментальних даних (тобто при  $\sigma \in (2,0 \dots 6,0)$  МПа).

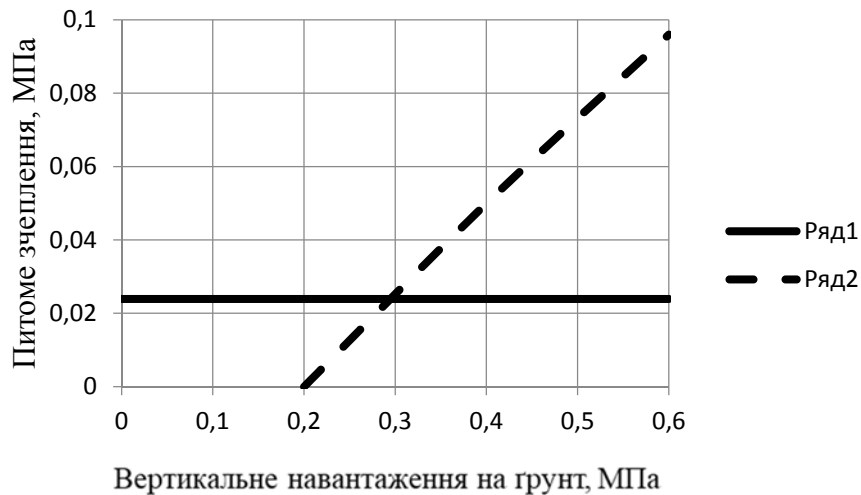


Рисунок 4 - Результати визначення кривих «питоме зчеплення - вертикальний тиск на зразок».

Ряд 1 - критерій міцності Кулона - Мора; 2 - критерій міцності О.Шашенко.

**Висновки.** Представлені в даній роботі матеріали досліджень дозволили зробити такі висновки:

1. Встановлено, що запропонований О.Шашенко критерій міцності ґрунту може цілком бути використаний для прогнозу міцності супіщаних ґрунтів.

2. Показано, що в області зміни експериментальних даних залежність «руйнівне навантаження - вертикальний тиск на ґрунт», встановлена в рамках критерію міцності О.Шашенко, має кращу відповідність експерименту, ніж аналогічна залежність, встановлена в рамках критерію міцності Кулона - Мора.

3. Встановлено, що екстраполяція експериментальних даних в область малих тисків з використанням критерію міцності О.Шашенко дає гірші результати, ніж використання для аналогічних цілей критерію міцності Кулона - Мора.

В цілому було зроблено висновок про те, що критерій міцності О.Шашенко цілком може бути використаний для прогнозу міцності супіщаних ґрунтів.

### References

1. Шутенко Л. М., Рудь А. Г., Кічаєва О. В. та ін.; під ред. Л. Н. Шутенко; Харків. нац. ун-т гір. госп-ва ім. А. Н. Бекетова. - Харків: ХНУГХ ім. А. Н. Бекетова, 2015. - 501 с.
2. Шашенко О. М., Пустовойтенко В. П., Сдвижкова Е. А. Геомеханіка. - К.: Новий друк, 2016
3. Sharoval, V., Shashenko, O., Napieiev, S., Khalymendyk, O., & Andrieiev, V. (2020). Stability assessment of the slopes and side-hills with account of the excess pressure in the pore liquid. *Mining of Mineral Deposits*, 14 (1), 91-99. <https://doi.org/10.33271/mining14.01.091>
4. ДСТУ Б В.2.1-2-96. Ґрунти. Класифікація.
5. ДСТУ Б В.2.1-17-2009. Ґрунти. Методи лабораторного визначення фізичних властивостей.
6. ДСТУ Б.В.2.1-4-96. Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформованості.
7. ДСТУ Б В.2.1-5-96. Ґрунти. Метод статистичної обробки результатів визначення характеристик.
8. Шаповал В. Г., Іванова Г. П., Жилінська С. Р., Іваськевич О. М., Лавренюк В. М. Методика визначення нормативних та розрахункових матеріальних констант, які входять у критерій міцності О. М. Шашенка. *Proceedings of the XVIII International Scientific and Practical Conference International Trends in Science and Technology October 31, 2019, Warsaw, Poland*, s. 24-29.
9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. Электронный ресурс. <https://www.twirpx.com/file/1900914/>. Добавлен 05.03.2020.