

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРАЦІЯ СОЛЬОВИХ РОЗЧИНІВ У ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ЇХ КОНЦЕНТРАЦІЇ І ТЕМПЕРАТУРИ

EXPERIMENTAL RESEARCH OF SALT SOLUTION FILTRATION DEPENDING ON THEIR CONCENTRATION AND TEMPERATURE



Кузло Микола Трохимович, доктор технічних наук, професор, Національний університет водного господарства та природокористування, кафедра автомобільних доріг, основ та фундаментів, завідувач кафедри, kuzlo-@ukr.net, +380966890792,

<https://orcid.org/0000-0001-9242-2478>.



Жуковська Наталія Анатоліївна, кандидат технічних наук, Національний університет водного господарства та природокористування, кафедра прикладної математики, доцент, n.a.zhukovska@gmail.com, +380971170598,

<https://orcid.org/0000-0001-7839-0684>.



Бойко Михайло Віталійович, Національний університет водного господарства та природокористування, кафедра прикладної математики, асистент, bojko_ak13@nuwm.edu.ua, +380976889522,

<https://orcid.org/0000-0002-0962-8625>.



Петрович Володимир Васильович, кандидат технічних наук, професор, старший науковий співробітник, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету. e-mail: petrovichvv60@ukr.net, тел. +3804428027338, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 138.,

<https://orcid.org/0000-0003-0422-2535>

Анотація: Експериментально досліджено, обґрунтовано та встановлено закономірності впливу концентрації сольових розчинів та їх температури на фільтраційні характеристики ґрунту. Виявлено суттєву відмінність між коефіцієнтом фільтрації сольових розчинів з урахуванням їх температури та фільтрацією чистої води. Дослідами встановлено, що при фільтрації сольових розчинів з концентрацією до 5% коефіцієнт фільтрації збільшився у 2 рази порівняно з фільтрацією чистої води. При подальшому збільшенні концентрації сольових розчинів спостерігається так зване явище осолонцювання ґрунтів, що призводить до різкого зменшення його водопроникності, а відповідно і коефіцієнта фільтрації.

Побудовано та перевірено на статистичну значимість і адекватність емпіричну залежність коефіцієнта фільтрації від концентрації фільтруючого розчину та температури у вигляді радіальних базисних функцій, які дозволили удосконалити математичну модель напружено-деформованого стану ґрунту з урахуванням нелінійних фільтраційних процесів, що відбуваються у ґрунтових масивах при наявності і фільтрації сольових розчинів.

Результати математичної обробки даних експериментів з дослідження залежності коефіцієнта фільтрації від концентрації фільтруючого розчину та його температури у найзручнішому вигляді з вибором оптимального масштабу наведено у вигляді графіків. Для проведення чисельних обчислень використовувалась інтерпретована об'єктно-орієнтована мова програмування Python 3.6 та бібліотека NumPy. Для побудови серверної частини веб-сервісу використано фреймворк Flask, а для клієнтської частини та візуалізації даних – мова програмування JavaScript та бібліотека Plotly.js відповідно. Розробка програмного забезпечення здійснювалася в IDE PyCharm Community Edition на базі операційної системи Ubuntu 16.04.

Ключові слова: ґрунти, фільтрація, концентрація, сольові розчини, математична модель

Вступ. Нерідко ґрунтові основи і споруди при будівництві і експлуатації підпадають дії такого техногенного фактору, як сольові розчини. Наявність сольових розчинів у ґрунтових масивах приводить зміни фільтраційних, міцностних і деформаційних властивостей ґрунту. Величина і інтенсивність зміни таких властивостей може бути суттєва, що призводить до виникнення не передбачених додаткових деформацій, порушення міцності і стійкості ґрунтових масивів тощо. Все це може ускладнювати нормальну експлуатацію будівель і споруд, а у деяких випадках призводить до аварій будівель і споруд та можуть приносити значний економічний збиток.

Водопроникливість одних і тих же ґрунтів значною мірою залежить від хімічного складу і концентрації фільтруючої рідини. Дослідження, що були виконані В.С.Шаровим і Б.В.Дерягіним [1], показали, що при фільтрації сольового розчину з концентрацією до 10% через монтморіллонітову глину, коефіцієнт фільтрації збільшився у 2 рази у порівнянні з фільтрацією чистої води. Подібні дослідження були проведені нами [2] для однорідних кварцових пісків крупністю фракцій 0,25мм. Фільтруючою рідиною був розчин $NaCl$ з концентрацією від 0 до 16 % . Даними дослідженнями було встановлено, що при фільтрації сольового розчину 5% концентрацією, коефіцієнт фільтрації досягав свого максимального значення в порівнянні з коефіцієнтом фільтрації чистої води. Результати вище наведених дослідів обмежувалися тільки концентрацією фільтруючої рідини. Температурний фактор сольових розчинів досить детально, як правило, не розглядався.

Серед останніх робіт зарубіжних вчених, присвячених дослідженню лінійних та нелінійних процесів динаміки підземних вод, тепло- і масопереносу в однорідних та неоднорідних ґрунтових середовищах, слід виділити праці [3, 4, 5, 6] та інших вчених. Однак, врахування у математичних моделях нелінійних процесів, що відбуваються при фільтрації сольових розчинів в ґрунтових середовищах, вимагає їх подальший розвиток.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Як відомо, процес фільтрації сольових розчинів в ґрунтових середовищах описується достатньо складною математичною моделлю. Складність даної математичної моделі полягає в тому, що наявність у воді тих чи інших асоційованих компонентів солей впливає на в'язкість фільтруючого сольового розчину, проникливості ґрунту, а через них на коефіцієнт фільтрації k . Таким чином, коефіцієнт фільтрації залежить як від властивостей ґрунтового середовища так і від властивостей рідини, що фільтрується. Складність даного фізичного процесу привела до того, що у багатьох випадках для спрощення математичної моделі, що описує процеси масопереносу солей, приймають малі та середні концентрації компонентів, які містяться у фільтраційному розчині. Крім цього, вважають, що швидкість фільтрації розчину, тобто об'ємна його кількість, що протікає за одиницю часу через одиничну площу при заданому градієнті напору, не залежить від зміни концентрації розчину.

Однак, як впливає з описаних нижче експериментальних досліджень фільтрації сольового розчину $NaCl$ у піщаних ґрунтах, коефіцієнт фільтрації, а отже, і швидкість фільтрації можуть значно змінюватися залежно від концентрації сольового розчину та його температури.

Ґрунт є складним пористим середовищем, яке здатне пропускати через себе рідини, гази та їх суміші, тобто бути проникливим. Ступінь проникливості у різних ґрунтах різна і визначається їх хіміко-мінеральним складом, структурно-текстурними особливостями, концентрацією рідини, що фільтрується, а також умовами при яких проходить фільтрація (величина напірного градієнта, температура тощо). Найменш вивченим і найбільш важливим з усіх перерахованих факторів є властивості рідини, що фільтрується.

Мета і методи. Для вивчення параметрів фільтрації сольових розчинів в піщаних ґрунтах і встановлення кількісної оцінки їх впливу на проникливість ґрунтів нами в геотехнічній лабораторії кафедри основ і фундаментів Національного університету водного господарства і природокористування

(НУВГП) виконано серію експериментів з визначення коефіцієнта фільтрації з урахуванням концентрації сольового розчину та його температури. З метою зменшення похибки експерименту і впливу різноманітних факторів, досліди проводили для однорідних кварцових пісків дрібних. Фільтруючою рідиною був розчин $NaCl$ з концентрацією від 0 до 160 г/л. Визначення коефіцієнта фільтрації сольового розчину виконувалось на стандартному приладі КФ-1. Підготовка приладу і ґрунту, що досліджувався, а також проведення самого експерименту, виконувалось за стандартною методикою відповідно з ДСТУ Б В.2.1-23:2009 [7].

Результати пояснення. Результати проведених досліджень коефіцієнта фільтрації залежно від концентрації фільтруючого розчину і його температури для одиничного градієнта напору наведені в таблиці 1.

В результаті математичної обробки даних експериментів методом радіальних базисних функцій отримано наступну залежність коефіцієнта фільтрації від концентрації фільтруючого розчину та його температури:

$$k(c, T) = \sum_{j=1}^{36} a_j \sqrt{1 + (c - c_j)^2 + (T - T_j)^2}, \quad (1)$$

де c – значення концентрації фільтруючого розчину, c_j – експериментальні значення концентрації фільтруючого розчину, T – температура, T_j – експериментальні значення температури, a_j – коефіцієнти апроксимуючої функції, що визначаються як
 $a_1 = -0,003$, $a_2 = 0,007$, $a_3 = -0,013$, $a_4 = 0,008$, $a_5 = 0,009$, $a_6 = 0,026$, $a_7 = 0,001$, $a_8 = 0,017$,
 $a_9 = -0,028$, $a_{10} = -0,029$, $a_{11} = 0,008$, $a_{12} = 0,024$, $a_{13} = 0,006$, $a_{14} = -0,050$, $a_{15} = -0,069$, $a_{16} = 0,005$,
 $a_{17} = -0,011$, $a_{18} = 0,022$, $a_{19} = 0,018$, $a_{20} = -0,068$, $a_{21} = -0,007$, $a_{22} = 0,005$, $a_{23} = 0,039$,

Таблиця 1 – Результати досліджень коефіцієнта фільтрації залежно від концентрації фільтруючого розчину і його температури.

Table 1 – The results of filtration coefficient research depending on filtration solution concentration and its temperature

$C, \text{г/л}$	Коефіцієнт фільтрації $k, \text{м/добу}$			
	$t = 16^\circ \text{C}$	$t = 25^\circ \text{C}$	$t = 50^\circ \text{C}$	$t = 75^\circ \text{C}$
0	0,20	0,22	0,78	0,80
20	0,30	0,32	0,96	1,00
40	1,20	1,43	1,80	1,88
60	0,40	0,50	3,24	3,50
80	0,38	0,43	2,24	4,90
100	0,40	0,44	1,22	4,00
120	0,39	0,44	0,96	1,80
140	0,39	0,45	0,80	1,60
160	0,40	0,47	0,60	1,60

Результати математичної обробки даних експериментів з дослідження залежності коефіцієнта фільтрації від концентрації фільтруючого розчину та його температури за формулою (1) наведено у вигляді графіка, що зображено на рис. 1. Для проведення чисельних обчислень використовувалась інтерпретована об'єктно-орієнтована мова програмування Python 3.6 та бібліотека NumPy. Для побудови серверної частини веб-сервісу використано фреймворк Flask, а для клієнтської частини та візуалізації даних – мова програмування JavaScript та бібліотека Plotly.js відповідно. Розробка програмного забезпечення здійснювалася в IDE PyCharm Community Edition на базі операційної системи Ubuntu 16.04.

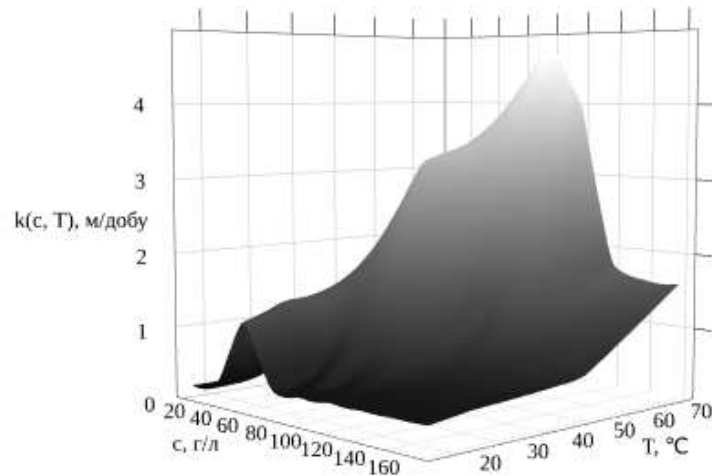


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнта фільтрації від концентрації фільтруючого розчину та температури

Figure 1 – Dependence of filtration coefficient on concentration of filtrating solution and temperature

Наявність і фільтрація сольових розчинів у ґрунтових середовищах, як показують лабораторні експерименти, супроводжуються процесами взаємодії між рідкими фазами (розчинами) і твердою фазою (мінеральними частинками). Дані процеси приводять до зміни складу і концентрації сольових розчинів і таким чином впливають на швидкість фільтрації (коефіцієнт фільтрації). Так, при збільшенні концентрації сольового розчину $NaCl$ від 0 до 4 – 8% коефіцієнт фільтрації різко зростає. При даній концентрації сольових розчинів отримали максимальне значення коефіцієнта фільтрації, який збільшився у 2 – 4 рази порівняно з фільтрацією чистої води. При подальшому збільшенні концентрації сольових розчинів спостерігається так зване явище осолонцювання ґрунтів, що призводить до різкого зменшення їх водопроникності, а відповідно і коефіцієнта фільтрації. Таку закономірність можна пояснити на основі фізико-хімічних процесів, що відбуваються між мінеральними частинками (твердою фазою) і сольовими розчинами (рідкою фазою). У даному випадку ми маємо дисперсну систему. Поверхнева енергія такої системи вимірюється поверхневим натягом, що виникає на межі дотику дисперсної фази з дисперсним середовищем і величиною сумарної поверхні всіх частин дисперсної фази. Будь-яка дисперсна система намагається зменшити свою поверхневу енергію. В системі “мінеральні частинки + розчин” може відбуватися її зменшення як за рахунок зниження величини сумарної поверхні, так і зменшення поверхневого натягу рідини. Останній фактор і призводить до стиснення дифузійних шарів рідини, а отже, і до додаткового ущільнення ґрунтів та збільшення коефіцієнта фільтрації.

Значний вплив на водопроникність і стисливість ґрунтів чинить склад обмінних катіонів. Так, насичення ґрунтів іоном натрію викликає помітне зменшення їх водопроникності і стисливості. Різким пониженням водопроникності і стисливості ґрунту від наявності обмінного катіона пояснюється його диспергуючою дією. У результаті чого зменшуються розміри пор і утворення в ґрунті значної кількості зв’язаної води, що призводить до зменшення водопроникності ґрунтів.

Крім того, слід зауважити, що при наявності сольових розчинів в таких дисперсних системах, як ґрунти, крім двох компонентів, твердої дисперсної фази і рідкого дисперсного середовища завжди присутній і третій компонент – електроліт, яким є сольовий розчин. При розчиненні солей у воді мінеральні частки ґрунту не залишаються пасивними до молекул або іонів розчинних солей. Дипольні молекули води, орієнтуючись в силовому полі молекул або іонів розчинної солі, утворюють навколо нього ущільнений гідратаційний шар. Гідратуються, або як кажуть у таких випадках, змочуються і тверді мінеральні частки. Так, дуже гідрофільні є глинисті ґрунти. Залежно від ступеня гідрофільності поверхня утримує різну кількість гідратаційної, або, як її називають, зв’язаної води. Вміст зв’язаної води у глинах доходить до 25%, що призводить до зменшення водопроникності ґрунтів.

Встановлена залежність коефіцієнта фільтрації від концентрації фільтруючого розчину та температури представляє науковий та практичний інтерес і в подальшому може використовуватись при побудові математичних моделей задач підземної гідромеханіки та аналізі фільтруючих властивостей ґрунтових середовищ.

Зокрема, в загальному випадку, математична модель, що описує напружено-деформований стан ґрунтових середовищ при врахуванні коефіцієнта фільтрації залежно від концентрації фільтруючого розчину та його температури в двовимірному випадку, має наступний вигляд [8, 9]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + X &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + Y &= 0, \quad \mathbf{X} \in \Omega, \end{aligned} \quad (2)$$

$$X = \frac{dp_1}{dx}, \quad Y = \gamma_{zs} + \frac{dp_2}{dy}, \quad p_1 = \gamma_p(h(\mathbf{X}) - x), \quad p_2 = \gamma_p(h(\mathbf{X}) - y), \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{D}\nabla c) + \nabla \cdot (\mathbf{D}_T \nabla T) - (\mathbf{v}, \nabla c) = n_p \frac{\partial c}{\partial t}, \quad \mathbf{X} \in \Omega, \quad t > 0, \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\lambda_T \nabla T) - \rho c_p \mathbf{v} \nabla T = c_T \frac{\partial T}{\partial t}, \quad \mathbf{X} \in \Omega, \quad t > 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-\mathbf{K}(c, T) \frac{\partial h}{\partial x} + \mathbf{v}_c \frac{\partial c}{\partial x} + \mathbf{v}_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\mathbf{K}(c, T) \frac{\partial h}{\partial y} + \mathbf{v}_c \frac{\partial c}{\partial y} + \mathbf{v}_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0, \quad (6)$$

$$\mathbf{v} = -\mathbf{K}(c, T) \nabla h + \mathbf{v}_c \nabla c + \mathbf{v}_T \nabla T, \quad \mathbf{X} \in \Omega, \quad t > 0, \quad (7)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y}, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right), \quad \mathbf{X} \in \Omega, \quad (8)$$

$$\sigma_x = \lambda \varepsilon_\theta + 2\mu \varepsilon_x, \quad \sigma_y = \lambda \varepsilon_\theta + 2\mu \varepsilon_y, \quad \tau_{xy} = 2\mu \varepsilon_{xy}, \quad \mathbf{X} \in \Omega \quad (9)$$

при відповідних крайових умовах для переміщень, напружень, концентрації фільтруючого розчину, температури та п'єзометричного напору в деякій досліджуваній області Ω . Тут використані наступні позначення: $\mathbf{X} = (x, y)$ – точка області Ω ; λ, μ – пружні сталі; $c(\mathbf{X}, t)$ – концентрація фільтруючого розчину; $T(\mathbf{X}, t)$ – температура; $h(\mathbf{X})$ – п'єзометричний напір; p_1, p_2 – фільтраційні тиски фільтруючого розчину; γ_{zs} – питома вага ґрунту, що знаходиться в зваженому стані; \mathbf{v} – вектор швидкості фільтрації; n_p – об'єм сольового розчину води в одиниці об'єму ґрунту; \mathbf{D} – коефіцієнт (тензор) конвективної дифузії; \mathbf{D}_T – коефіцієнт (тензор) термодифузії; λ_T – коефіцієнт (тензор) ефективної теплопровідності вологого ґрунту; ρ – густина сольового розчину; c_p – питома теплоємність сольового розчину; c_T – об'ємна теплоємність ґрунту при сталому об'ємі; $\mathbf{K}(c, T)$ – коефіцієнт (тензор) фільтрації, що обчислюється за формулою (1); \mathbf{v}_c – коефіцієнт (тензор) хімічного осмосу, \mathbf{v}_T – коефіцієнт (тензор) термічного осмосу; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}, \sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ – нормальні та дотичні деформації та напруження; t – час.

Висновки та рекомендації. Отримані експериментальні дані, а також їх статистична обробка дали змогу кількісно і якісно оцінити процеси фільтрації сольових розчинів у ґрунтових середовищах залежно від властивостей фільтруючої рідини, тобто від її концентрації і температури. Дані експериментальних досліджень можна використовувати при оцінці стану ґрунтових основ і споруд за деформаціями та несучою здатністю. Подальшими дослідженнями можуть бути оцінка напружено-деформованого стану ґрунтових основ і споруд з урахуванням нелінійних процесів, що відбуваються при фільтрації сольових розчинів різної із змінною температурою.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF SALT SOLUTION FILTRATION DEPENDING ON THEIR CONCENTRATION AND TEMPERATURE

Kuzlo Mykola Trohymovych, doctor of technical sciences, professor, National university of water management and environmental engineering, department of highways, basis and foundations, head of department kuzlo-@ukr.net, +380966890792, <https://orcid.org/0000-0001-9242-2478>.

Zhukovska Nataliya Anatoliyivna, candidate of technical sciences, National university of water management and environmental engineering, department of applied mathematics, associate professor, n.a.zhukovska@gmail.com, +380971170598, <https://orcid.org/0000-0001-7839-0684>.

Boyko Mykhaylo Vitaliyovych, National university of water management and environmental engineering, department of applied mathematics, junior lecturer bojko_ak13@nuwm.edu.ua, +380976889522, <https://orcid.org/0000-0002-0962-8625>.

Petrovich V.V., Candidate of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher, Professor of the Transportation Construction and Property Management Department, National Transport University. e-mail: petrovichvv60@ukr.net, tel. +3804428027338, Ukraine, 01010, Kyiv, street M. Omelyanovicha-Pavlenka, 1, room 138., <https://orcid.org/0000-0003-0422-2535>

Abstract: The laws of salt solution concentration's influence and their temperature on soil filtration characteristics have been experimentally investigated, substantiated and determined. A significant difference was found between the filtration coefficient of saline solutions, taking into account their temperature and the filtration of pure water. Experiments have shown that under the process of saline solutions filtration with a concentration of up to 5%, the filtration coefficient increased 2 times compared with the filtration of pure water. With a further increase in the concentration of saline solutions there is a so-called phenomenon of soil salinization, which leads to a sharp decrease in its water permeability, and, as a result, the filtration coefficient.

The empirical dependence of the filtration coefficient on the concentration of the filter solution and temperature in the form of radial basis functions was constructed and tested for statistical significance and adequacy, which allowed to improve the mathematical model of the stress-strain state of the soil taking into account the nonlinear filtration processes in the presence of non-linear filtration processes solutions.

The results of mathematical processing of these experiments for investigation of the dependence of the filtration coefficient on the concentration of the filter solution and its temperature in the most convenient form with the choice of the optimal scale are shown in graphs. Python 3.6 programming language and NumPy library were used for numerical calculations. Flask framework was used to build the server part of the web service, and JavaScript and Plotly.js library were used for the client part and data visualization. The software was developed in the IDE PyCharm Community Edition based on the Ubuntu 16.04 operating system.

Key words: soils, filtration, concentration, salt solutions, mathematical model.

Referenses

- 1 Gruntovedeniye / Pod red. Ye. M. Sergeeva. – M.: Izd.-vo MGU, 1983.- 390 p.
2. Vlasyuk A.P., Kuzlo M.T. Eksperymental'ni doslidzhennya deyakykh parametriv fil'tratsiyi sol'ovyykh rozchyniv u pishchanykh hruntakh // Melioratsiya i vodne hospodarstvo. – 2001.- Vyp.. 87. – P. 139 – 145.
3. Bohnhoff G. L., Shackelford C. D. Salt diffusion through a bentonite-polymer composite / G. L. Bohnhoff, C. D. Shackelford // Clays and Clay Minerals. – 2015. - Vol. 63, No. 3. - PP. 145-162.
4. Neuzil C. E., Person M. Reexamining ultrafiltration and solute transport in groundwater / C. E Neuzil, M. Person // Water Resour. Res. – 2017. – 53. – Pp. 4922–4941.
5. Bonelli S. Approximate solution to the diffusion equation and its application to seepage-related problems / S. Bonelli // Applied Mathematical Modeling. – 2009. – V. 33. – P. 110–126.
6. Chernuha O. Admixture mass transfer in a body with horizontally periodical structure / O. Chernuha // Ibid. – 2005. – V. 48. – P.2290–2298.
7. Hrunty. Metody laboratornoho vyznachennya koefitsiyenta fil'tratsiyi: DSTU B V.2.1-23:2009. [Chynni vid 2009-12-22]. – K.: Minrehionbud Ukrayiny. Derzhavne pidpryemstvo “Ukrarkhbudinform”, 2010. – 12 p. – (Derzhavnyy standart Ukrayiny).
8. Vlasyuk A.P. Mathematical simulation of the stressed-strained state of the foundation of earth dams with an open surface under the influence of heat and mass transfer in two-dimensional case / A.P. Vlasyuk, N.A. Zhukovskaya // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. March 2015, Volume 88, Issue 2, pp. 329-341.
9. Vlasyuk A.P. Mathematical Modelling of three-dimensional problem of soil mass stressed-strained state considering mass and heat transfer / A.P. Vlasyuk, N.A. Zhukovska, V.V. Zhukovskyy, Aleksandra Klos-Witkowska, Ihor Pazdriy, Uliana Iatsykovska // Proceedings of the 2017 IEEE 9th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, September.