

УДК 627.324.2/3:532.72

Власюк А.П.¹, д.т.н., професор,
Цветкова Т.П.², аспірант

Математичне моделювання перенесення солей при сумісній фільтрації та вологоперенесенні у насичено-ненасичених ґрунтах в лінійній постановці

Проведено математичне моделювання процесу перенесення солей при сумісній фільтрації і вологоперенесенні в насичено-ненасичених ґрунтах. Числові розв'язки відповідних крайових задач отримано методом скінченних різниць. Розроблено відповідне програмне забезпечення, з використанням якого проведено числові експерименти та зроблено їх аналіз.

Ключові слова: масоперенесення, вологоперенесення, повне і неповне насичення, напір, концентрація.

¹ Національний університет водного господарства та природокористування, 33000 м. Рівне, вул. Соборна, 11, e-mail: A.P.Vlasyuk@rambler.ru

² Національний університет водного господарства та природокористування, 33000 м. Рівне, вул. Соборна, 11, e-mail: Tsvetkova@ukr.net

Статтю представив д.т.н., проф. Гаращенко Ф.Г.

Вступ. Перенесення солей в областях повного і неповного насичення являє собою актуальну задачу, оскільки пов'язане із засоленням родючих земель і проблемою їх використання в с/г.

Даним питанням присвячено ряд робіт [1-6]. Однак, в вищезгаданих роботах дані процеси розглядалися окремо в областях повного і неповного насичення; домінували лише процеси вологоперенесення без врахування масоперенесення.

В даній роботі розглядається сумісно задача масоперенесення сольових розчинів як у водонасичених, так і у водоненасичених ґрунтових середовищах в одновимірному лінійному випадку. Її розв'язок отримано методом скінченних різниць. Для більш повного

A.P. Vlasyuk¹, Doctor of science, prof.,
T.P. Tsvetkova², PhD student

Mathematical model of the salt transfer during the filtration and the moisture transfer in full and partial saturation soils in the linear formulation

Mathematical model of the salt transfer during the filtration and the moisture transfer in full and partial saturation soils is formulated. Numerical solutions of respective boundary problems are obtained by means of finite differences method. Proper software is developed using which numerical experiments and their analysis are performed.

Key words: mass transfer, moisture transfer, full and partial saturation soils, pressure, concentration.

¹ National University of Water Management National Resources Use, 33000 Rivne, Soborna st, 11, e-mail: A.P.Vlasyuk@rambler.ru

² National University of Water Management National Resources Use, 33000 Rivne, Soborna st, 11, e-mail: Tsvetkova@ukr.net

опису вказаних процесів в математичній моделі задачі враховано наявність осмотичних явищ [8, 10].

Постановка задачі. Дослідимо процес перенесення сольових розчинів при сумісній фільтрації та вологоперенесенні в насичено-ненасиченому ґрунті (рис. 1).

На поверхню ґрунту можуть попадати атмосферні опади і поливи. В зв'язку з цим, на деякій глибині l_1 від поверхні землі утворюється вільна поверхня рівня ґрунтових вод (РГВ), яка надалі вважається нерухомою. На глибині l_2 є фронт промочування, який для простоти будемо вважати нерухомим (рис. 1).

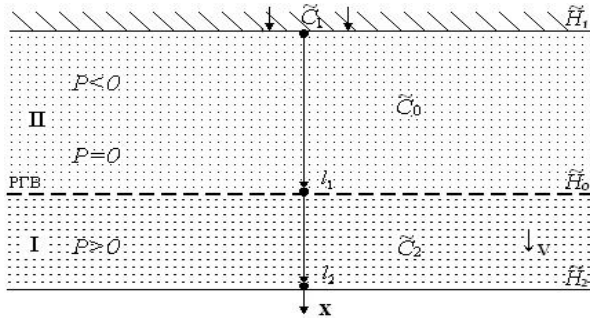


Рис.1. Перенесення солей в областях повного і неповного насичення

Таким чином, в ґрунтовому масиві сформувалося дві області: II – область неповного насичення – між поверхнею землі і вільною поверхнею; I – область повного насичення – між вільною поверхнею та фронтом промочування. Крім того, на поверхню ґрунту може потрапляти сольовий розчин з атмосферними опадами або за рахунок інших факторів з концентрацією \tilde{C}_1 . Розподіл концентрації в області неповного насичення - \tilde{C}_0 , в області повного насичення - \tilde{C}_2 .

Потрібно розрахувати напір води в області неповного насичення, розподіл п'єзометричних напорів в області повного водонасичення та поле розподілу концентрації солей в даних областях; дослідити вплив осмосу на процеси масо- та вологоперенесення в ґрунтовому середовищі.

Математична модель задачі. Математична модель задачі масоперенесення при фільтрації сольових розчинів в області повного насичення G_1 має вигляд [8, 9]

$$\frac{\partial \left(D_1 \frac{\partial c_1}{\partial x} \right)}{\partial x} - v_1 \frac{\partial c_1}{\partial x} - \gamma_1 (c_1 - C_1^*) = \sigma_1 \frac{\partial c_1}{\partial t}, \quad (1)$$

$$v_1 = -k_1 \frac{\partial h_1}{\partial x} + u_1 \frac{\partial c_1}{\partial x}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_1 \frac{\partial h_1}{\partial x} - u_1 \frac{\partial c_1}{\partial x} \right) = 0. \quad (3)$$

Рівняння (1)-(3) доповнюються крайовими умовами для концентрації солей $c_1(x, t)$

$$c_1(x, 0) = \tilde{C}_0^1(x), \quad c_1(0, t) = \tilde{C}_1^1(t), \quad (4)$$

$$c_1(l_2, t) = \tilde{C}_2^1(t);$$

для напору $h_1(x, t)$

$$h_1(x, 0) = \tilde{H}_0^1(x), \quad h_1(0, t) = \tilde{H}_1^1(t), \quad (5)$$

$$h_1(l_2, t) = \tilde{H}_2^1(t).$$

Математична модель задачі масоперенесення солей при вологоперенесенні в області неповного насичення G_2 має вигляд [8, 10]

$$\frac{\partial \left(D_2 \frac{\partial c_2}{\partial x} \right)}{\partial x} - v_2 \frac{\partial c_2}{\partial x} - \gamma_2 (c_2 - C_2^*) = \sigma_2 \frac{\partial c_2}{\partial t}, \quad (6)$$

$$\mu(h) \frac{\partial h_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_2 \frac{\partial h_2}{\partial x} \right) - u_2 \frac{\partial c_2}{\partial x}, \quad (7)$$

$$v_2 = -k_2 \frac{\partial h_2}{\partial x} + u_2 \frac{\partial c_2}{\partial x}. \quad (8)$$

Диференціальні рівняння (6), (7) доповнюються наступними крайовими умовами для концентрації солей $c_2(x, t)$

$$c_2(x, 0) = \tilde{C}_0^2(x), \quad c_2(l_2, t) = \tilde{C}_2^2(t); \quad (9)$$

для напору

$$h_2(x, 0) = \tilde{H}_0^2(x), \quad h_2(0, t) = \tilde{H}_1^2(t), \quad (10)$$

$$h_2(l_2, t) = \tilde{H}_2^2(x).$$

На РГВ задаються умови спряження для напору та концентрації відповідно

$$[h] |_{x=l_1} = [c] |_{x=l_1} = \left[cv_x - D(c) \frac{\partial c}{\partial x} \right] |_{x=l_1} = 0. \quad (11)$$

В рівняннях (1)-(11) використані такі позначення: D_1, D_2 – коефіцієнти конвективної дифузії; $c_1(x, t), c_2(x, t)$ – концентрації сольових розчинів в областях повного і неповного насичення відповідно; C_1^*, C_2^* – коефіцієнти граничного насичення сольових розчинів; σ_1, σ_2 – пористоті ґрунту в областях повного і неповного насичення відповідно; h_1 – п'єзометричний напір, h_2 – напір води; u_1, u_2 – коефіцієнти осмосу; $[h] |_{x=l_1}, [c] |_{x=l_1}$ – стрибки функцій відносно напорів та концентрацій солей, задані на межі двох областей.

Числовий метод розв'язування задачі. Для знаходження числового розв'язку поставлених задач (1)-(11) використаємо метод скінченних різниць. Знайдемо спочатку числовий розв'язок задачі в області повного насичення. Розкривши дужки в (2), отримаємо

$$k_1 \frac{\partial^2 h_1}{\partial x^2} - u_1 \frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2} = 0.$$

Для знаходження розв'язку задачі фільтрації (2), (3), (5) використаємо неявну різницеву схему [7], яка має вигляд

$$\frac{k_1}{h_1^2} [H_{li+1}^{j+1} - 2H_{li}^{j+1} + H_{li-1}^{j+1}] = u_1 \frac{C_{li+1}^{j+1} - 2C_{li}^{j+1} + 2C_{li-1}^{j+1}}{h_1^2} \quad (12)$$

або
$$\frac{k_1}{h_1^2} H_{li+1}^{j+1} - 2\frac{k_1}{h_1^2} H_{li}^{j+1} + \frac{k_1}{h_1^2} H_{li-1}^{j+1} = \frac{u_1}{h_1^2} C_{li+1}^{j+1} - \frac{2u_1}{h_1^2} C_{li}^{j+1} + \frac{u_1}{h_1^2} C_{li-1}^{j+1}. \quad (13)$$

Розв'язок різницевої схеми (12), (13) знайдемо методом прогонки. Для цього запишемо дану різницеву схему в прогоночному вигляді

$$a_1 H_{li-1}^{j+1} - c_1 H_{li}^{j+1} + b_1 H_{li+1}^{j+1} = -f_1, \quad (14)$$

де
$$a_1 = \frac{k_1}{h_1^2}, \quad b_1 = \frac{k_1}{h_1^2}, \quad c_1 = \frac{2k_1}{h_1^2},$$

$$f_1 = -u_1 \frac{C_{li+1}^{j+1} - 2C_{li}^{j+1} + C_{li-1}^{j+1}}{h_1^2}, \quad i = \overline{0, n}, \quad j = \overline{0, m}.$$

Розв'язок задачі фільтрації за методом прогонки знаходимо у вигляді

$$H_{li}^{j+1} = \alpha_{i+1} H_{li+1}^{j+1} + \beta_{i+1}, \quad (15)$$

де
$$\alpha_{i+1} = \frac{b_1}{c_1 - \alpha_{i+1} a_1}, \quad \beta_{i+1} = \frac{a_1 \beta_i + f_1}{c_1 - \alpha_i a_1},$$

$$\alpha_1 = 0, \quad \beta_1 = H_1^1(t), \quad i = \overline{0, n}, \quad j = \overline{0, m}.$$

Для знаходження числового розв'язку задачі масоперенесення (1), (3), (4) застосуємо монотонну різницеву схему [7].

$$\sigma_1 \frac{C_{li}^{j+1} - C_i^j}{\tau} = \eta_i^{j+1} \frac{H_{li+1}^{j+1} - 2H_i^{j+1} + H_{li-1}^{j+1}}{h_1^2} + (r^+)_i^{j+1} \left(\frac{C_{li+1}^{j+1} - C_{li}^{j+1}}{h_1} \right) + (r^-)_i^{j+1} \left(\frac{C_{li}^{j+1} - C_{li-1}^{j+1}}{h_1} \right) - \gamma_1 (C_{li}^{j+1} - C_1^*), \quad (16)$$

де
$$\eta_i^{j+1} = \frac{1}{1 + 0,5 \cdot h_1 \cdot |r_i^j|}, \quad r_i^j = (r^+ + r^-),$$

$$(r^+)_i^{j+1} = \frac{-V_{li}^{j+1} + |V_{li}^{j+1}|}{2} \geq 0,$$

$$(r^-)_i^{j+1} = \frac{-V_{li}^{j+1} - |V_{li}^{j+1}|}{2} \leq 0.$$

Розв'язок різницевої схеми (16) знайдемо методом прогонки. Для цього запишемо дану різницеву схему в прогоночному вигляді

$$a_2 C_{1,i-1}^{j+1} - c_2 C_{1,i}^{j+1} + b_2 C_{1,i+1}^{j+1} = -f_2, \quad (17)$$

де
$$a_2 = \frac{\tau}{\sigma_1} \left(\frac{2\eta_i^{j+1}}{h_1^2} - \frac{(r^-)_i^{j+1}}{h_1} \right),$$

$$b_2 = \frac{1}{h_1} \left(\frac{d_{i+1}^j \eta_{i2}^j}{h_1} + r_{i+}^j \right), \quad f_2 = \frac{\sigma_1}{\tau} C_{li}^j + \gamma_1 C_1^*,$$

$$c_2 = \frac{1}{h_1^2} \left(d_i^j \eta_{i1}^j + d_i^j \eta_{i2}^j \right) + \frac{|r_i^j|}{h_1} + \frac{\sigma_1}{\tau}.$$

Розв'язок задачі (17) методом прогонки знаходимо у вигляді

$$C_{li}^{j+1} = \alpha_{i+1} C_{li+1}^j + \beta_{i+1}^1, \quad (18)$$

де
$$\alpha_{i+1} = \frac{b_i}{c_2 - \alpha_i a_2}, \quad \beta_{i+1} = \frac{a_2 \beta_i + f_2}{c_2 - \alpha_i a_2},$$

$$\alpha_1 = 0, \quad \beta_1 = \tilde{C}_1^1, \quad i = \overline{0, n}, \quad j = \overline{0, m}.$$

Різницеве рівняння для обчислення швидкості фільтрації має наступний вигляд

$$V_i^{j+1} = -k_{1,i}^j \left(\frac{H_{1,i+1}^j - H_{1,i-1}^j}{2h_1} + u_1 \frac{C_{1,i+1}^j - 2C_{1,i}^j + C_{1,i-1}^j}{h_1^2} \right),$$

Для знаходження розв'язку задачі масоперенесення солей в області неповного насичення застосуємо неявну різницеву схему [7].

$$(H_{2i}^{j+1} - H_{2i}^j) = \frac{k_2 \tau}{h_2^2 \mu_i} \left(\frac{C_{li-1}^{j+1} - 2C_{2i}^{j+1} + C_{2i+1}^{j+1}}{h_2^2} \right) -$$

$$-u_2 \frac{\tau}{h_2^2 \mu_i} (C_{2i+1}^{j+1} - 2C_{2i}^{j+1} + C_{2i-1}^{j+1}), \quad (19)$$

де
$$\mu_i = a \rho g \left(1 - \frac{2 \cdot h}{H_{i+1}^k - H_{i-1}^k} \right).$$

Розв'язок різницевої схеми (19) знайдемо методом прогонки. Для цього запишемо дану різницеву схему в прогоночному вигляді

$$a_3 C_{li-1}^{j+1} - c_3 C_{li}^{j+1} + b_3 C_{li+1}^{j+1} = -f_3, \quad (20)$$

де
$$a_3 = \frac{k_2}{h_2^2}, \quad b_3 = a_3, \quad c_3 = \frac{\mu_i}{\tau} + \frac{2k_2}{h_1^2},$$

$$f_3 = \left(\frac{\mu_i}{\tau} H_{li}^j - \frac{u}{h_2} (C_{2i+1}^j - 2C_{2i}^j + C_{2i-1}^j) \right).$$

Числовий розв'язок задачі вологоперенесення методом прогонки знаходимо у вигляді

$$H_{2i}^j = \alpha_{i+1} H_{i+1}^j + \beta_{i+1}, \quad (21)$$

де
$$\alpha_{i+1}^3 = \frac{b_3}{c_3 - \alpha_i^3 a_3}, \quad \beta_{i+1} = \frac{a_3 \beta_i + f_3}{c_3 - \alpha_i a_3}.$$

Для розв'язування задачі масоперенесення солей (6), (8), (9) використаємо монотонну різницеву схему [7].

$$\sigma_2 \frac{C_{2i}^{j+1} - C_{2i}^j}{\tau} = \eta_i^{j+1} \frac{C_{2i+1}^{j+1} - 2C_{2i}^{j+1} + C_{2i-1}^{j+1}}{h_2^2} + (r^+)_i^{j+1} \left(\frac{C_{2i+1}^{j+1} - C_{2i}^{j+1}}{h_2} \right) + (r^-)_i^{j+1} \left(\frac{C_{2i+1}^{j+1} - C_{2i}^{j+1}}{h_2} \right) - \gamma_2 (C_{2i}^{j+1} - C_2^*) \quad (22)$$

де
$$\mu_3 = \frac{1}{1 + 0.5h_1|r_3^2|} = \frac{1}{1 + \frac{h_1 D_3}{2A_3}}, \quad r_i^j = (r^+ + r^-),$$

$$(r^+)_i^{j+1} = \frac{-V_{2i}^{j+1} + |V_{2i}^{j+1}|}{2} \geq 0,$$

$$(r^-)_i^{j+1} = \frac{-V_{2i}^{j+1} - |V_{2i}^{j+1}|}{2} \leq 0.$$

Розв'язок задачі масоперенесення знайдемо за методом прогонки. Рівняння (22) в прогоночному вигляді наступне:

$$a_4 C_{2i-1}^{j+1} - c_4 C_{2i}^{j+1} + b_4 C_{2i+1}^{j+1} = -f_4, \quad (23)$$

де
$$a_4 = \frac{\tau}{\sigma_2} \left(\frac{2\eta_i^{j+1}}{h_2^2} - \frac{(r^-)_i^{j+1}}{h_2} \right), \quad f_4 = \frac{\sigma}{\tau} C_{2i}^j + \gamma C^*,$$

$$b_4 = \frac{\tau}{\sigma_2} \left(\frac{2\eta_i^{j+1}}{h_2^2} - \frac{(r^+)_i^{j+1}}{h_2} \right),$$

$$c_4 = \frac{\tau}{\sigma_2} \left(\frac{2\eta_i^{j+1}}{h_2^2} + \frac{(r^+)_i^{j+1} - (r^-)_i^{j+1}}{h_2} + \gamma_2 \right).$$

Числовий розв'язок задачі масоперенесення солей в області неповного насичення знаходимо у вигляді

$$C_{2i}^j = \alpha_{i+1} C_{2i+1}^j + \beta_{i+1}, \quad (24)$$

де
$$\alpha_{i+1} = \frac{b_i}{c_4 - a_i \alpha_4}, \quad \beta_{i+1} = \frac{a_4 \beta_i + f_4}{c_4 - \alpha_i a_4},$$

$i = \overline{0, n}, \quad j = \overline{0, m}.$

Розв'язок задачі масоперенесення солей на РГВ, згідно методу прогонки, має вигляд

$$C_i^{j+1} = \alpha_{i+1} C_{i+1}^{j+1} + \beta_{i+1}, \quad (25)$$

$$\text{де } \alpha_{i+1} = \begin{cases} \frac{b_i}{c_i - a_i \alpha_i}, & i = \overline{0, n_s - 1}, \\ \frac{D_{n_s}^j}{(D_{n_s+1}^j - v_{n_s+1}^j) + (D_{n_s}^j - v_{n_s}^j)(1 - \alpha_{n_s})}, & i = n_s, \\ \frac{b_i}{c_i - a_i \alpha_i}, & i = \overline{n_s + 1, n - 1}. \end{cases}$$

$$\beta_{i+1} = \begin{cases} \frac{a_i \beta_i + c_i + s_i}{c_i - a_i \alpha_i}, & i = \overline{0, n_s - 1}, \\ \frac{D_{n_s}^j \beta_i}{(D_{n_s+1}^j - v_{n_s+1}^j) + (D_{n_s}^j - v_{n_s}^j)(1 - \alpha_{n_s})}, & i = n_s, \\ \frac{a_i \beta_i + c_i + s_i}{c_i - a_i \alpha_i}, & i = \overline{n_s + 1, n - 1}. \end{cases}$$

n_s - значення координати на РГВ.

Отже, алгоритм розв'язування задачі масоперенесення солей у насичено-ненасиченому ґрунтовому середовищі побудовано повністю.

Програмна реалізація та результати числових експериментів. Проведена програмна реалізація числового розв'язку даної задачі в інтегрованому середовищі візуально-подійного програмування Visual Studio 2010 на мові програмування C#.

Створена комплексна програма числового розв'язування задачі, що включає розв'язування задачі масоперенесення в області неповного та повного насичення, знаходження сумісного розв'язку задачі в насичено-ненасиченому ґрунтовому середовищі.

На основі програмної реалізації задачі були проведені числові експерименти, що дало можливість провести аналіз отриманих результатів для різних вихідних даних задачі та детально дослідити процеси масопереносу при фільтрації та вологоперенесенні в насичено-ненасичених ґрунтових середовищах.

Розв'язок задачі знайдено при таких вхідних даних: $T = 360 \text{ діб}, \quad l_1 = 1 \text{ м}, \quad l_2 = 0,5 \text{ м},$

$$\sigma_1 = \sigma_2 = 0,4, \quad \gamma_1 = \gamma_2 = 0,0065,$$

$$k_1 = k_2 = 2,3 \text{ м} / \text{добу}, \quad D_m = 0,2 \text{ м}^2 / \text{добу},$$

$$\rho = 1000 \text{ кг} / \text{м}^3, \quad C_* = 350 \text{ г} / \text{літр},$$

$$u_1 = u_2 = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^5 / \text{кг} \cdot \text{доба},$$

$$\tilde{C}_0 = 0 \text{ г} / \text{літр}, \quad \tilde{C}_1 = 0 \text{ г} / \text{літр},$$

$$\tilde{C}_2 = 10 \text{ г} / \text{літр}, \quad H_1^1 = 1,4 \text{ м}, \quad H_2^1 = 0,05 \text{ м},$$

$$H_1^2 = 1,8 \text{ м}, \quad H_2^2 = 1,4 \text{ м}.$$

Результатом розв'язання задачі масоперенесення в області неповного насичення є знаходження значень розподілу напорів води та концентрації солей в заданій області.

Графічне представлення значень розподілу напорів води має вигляд (рис. 2, 3)

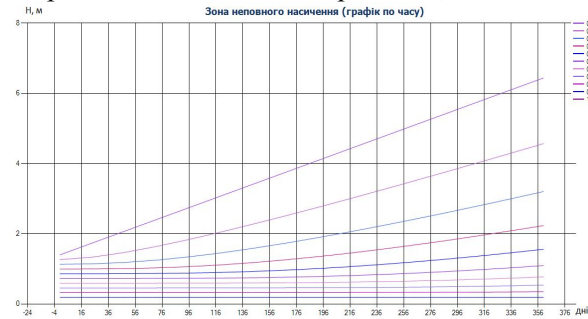


Рис.2. Графік розподілу напорів води з часом

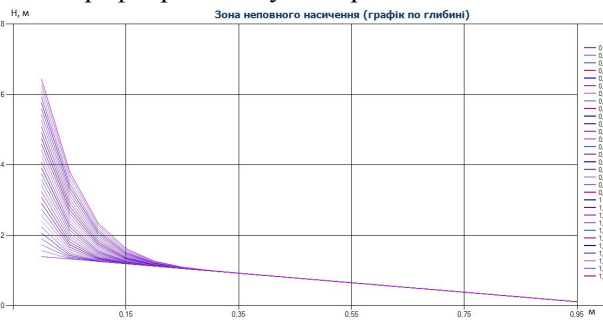


Рис.3. Графік розподілу напорів води з глибиною

За результатами задач вологоперенесення та швидкості фільтрації знайдено розв'язок задачі масоперенесення солей в області неповного насичення. Графічне представлення розподілу концентрації солей має вигляд (рис. 4)

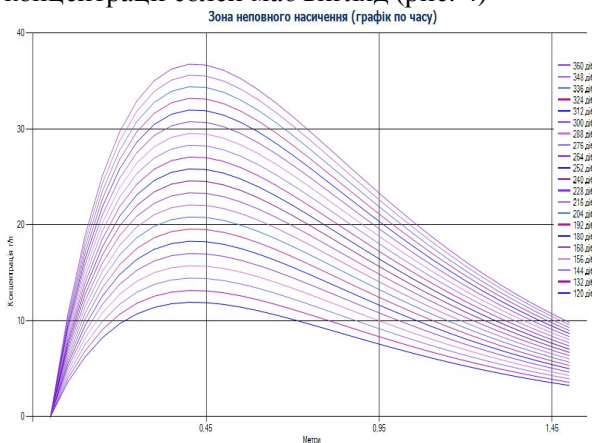


Рис.4. Графік розподілу концентрації солей в області неповного насичення

Розв'язавши задачу масоперенесення солей в області неповного насичення, знайдено розв'язок

задачі в області повного насичення ґрунтового середовища.

Графіки розподілу п'езометричних напорів мають вигляд (рис. 5, 6)

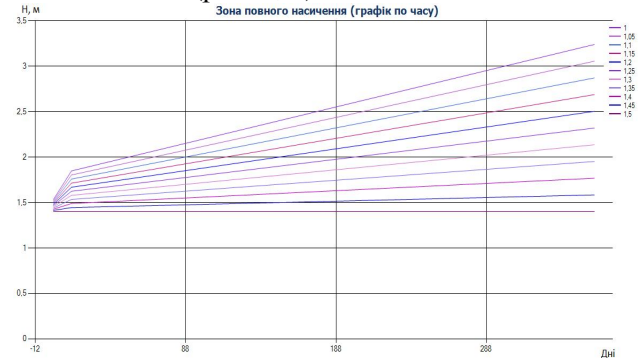


Рис.5. Графік залежності п'езометричних напорів від часу

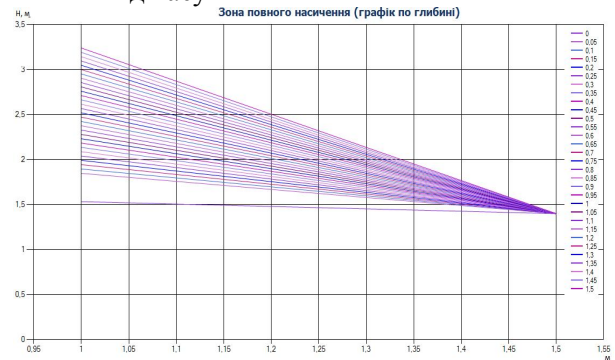


Рис. 6. Графік залежності розподілу п'езометричних напорів від товщини шару ґрунту

В результаті числового розв'язання задачі масоперенесення солей в області повного насичення отримали наступні графіки розподілів концентрації (рис. 7, 8).

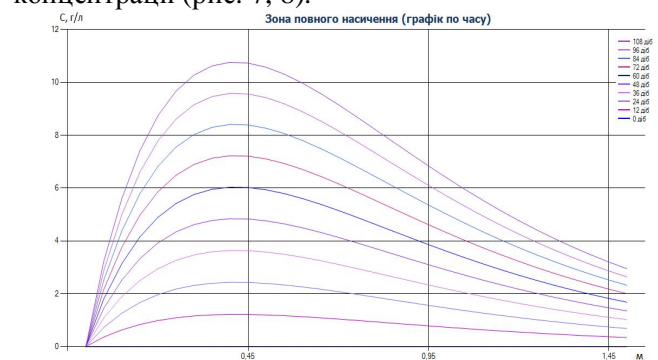


Рис.7. Графік залежності розподілу концентрації солей від часу

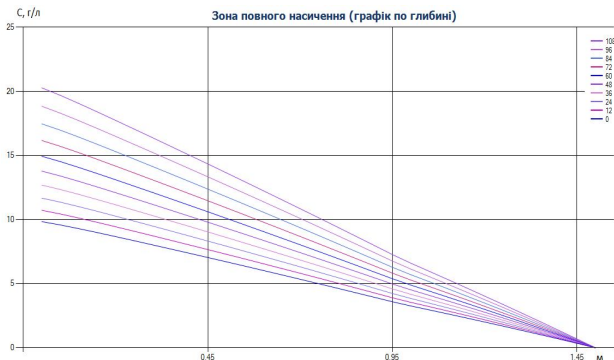


Рис.8. Графік залежності розподілу концентрації солей від товщини шару ґрунту

Важливою особливістю даної задачі є сумісний розгляд задачі масоперенесення солей в областях повного та неповного насичення. Графіки розподілу концентрації солей в області насичено-ненасиченого ґрунтового середовища мають вигляд (рис.9,10)

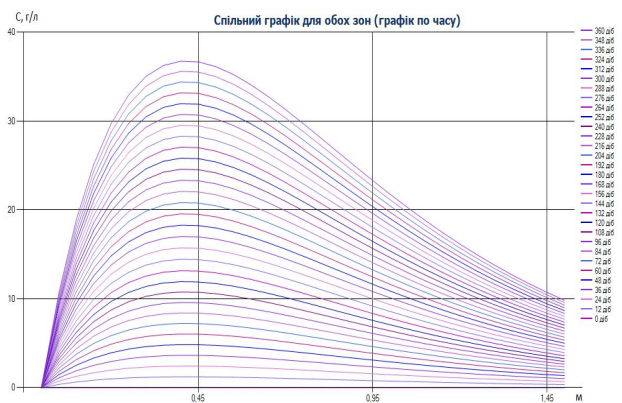


Рис.9. Графік залежності розподілу концентрації солей від товщини шару ґрунту в насичено-ненасиченій області

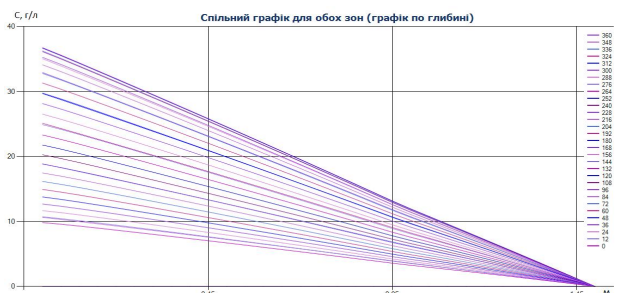


Рис.10. Графік залежності розподілу концентрації солей від часу в насичено-ненасиченій області

Також знайдено розподіл концентрації солей на межі РГВ, візуалізація отриманих значень розподілу концентрації солей має вигляд (рис. 11)

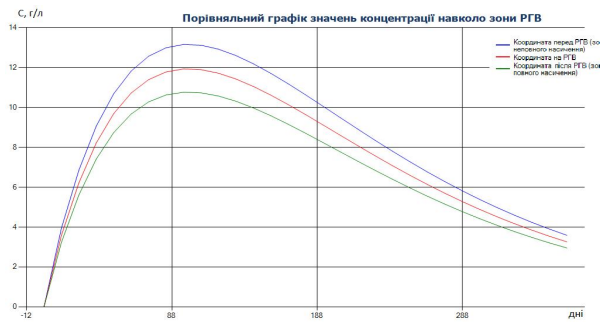


Рис.11. Графік розподілу концентрації солей на РГВ

Знайшовши розв'язок задачі в областях неповного та повного насичення, проаналізуємо отримані результати. Розподіл напорів вологи зменшується з часом (рис. 2), набуваючи найменших значень на максимальному часовому шарі ($T = 360 \text{ дб}$). Напір вологи зростає по всій області вологоперенесення, набуваючи найбільших значень в околі вільної поверхні (рис. 3).

Із графіка розподілу поля концентрації області неповного насичення (рис. 4) видно, що розподіл концентрації солей найбільших значень набуває в першій третині часового проміжку, в подальшому – розподіл концентрації солей зменшується з часом, що пояснюється вимиванням сольових розчинів з пористого середовища; значення розподілу концентрації солей спадають з глибиною рівномірно, набуваючи найменших значень на РГВ. Розподіл концентрації монотонно спадає по всій області вологоперенесення.

В області повного насичення графік розподілу п'єзометричних напорів (рис. 5) демонструє, що розподіл напорів рідини зменшується з часом; значення напорів рідини зростають з глибиною пористого середовища (рис. 6).

Розподіл концентрації солей зменшується з часом та з глибиною, набуваючи менших значень в порівнянні з розподілом концентрації в області неповного насичення (рис. 7, 8).

Оскільки, області повного та неповного насичення розглядалися в комплексі, то отримано спільний графік розподілу концентрації солей області насичено-ненасиченого ґрунтового середовища (рис. 9). Встановлено, що розподіл концентрації сольових розчинів в області насичено-ненасиченого середовища з глибиною та з часом зменшується.

Знайдено розв'язок задачі масоперенесення солей на межі двох областей (рис. 11). З

глибиною розподіл концентрації зменшується, набуваючи найменших значень в околі вільної поверхні. З початком області повного насичення концентрація солей значно зменшується.

Проведення ряду числових експериментів при різних вхідних даних дозволило встановити наступні результати: при різних значеннях коефіцієнтів дифузії ($D_1 = 0,01, D_2 = 0,2$) та коефіцієнтів масообміну ($\gamma_1 = 0.0065, \gamma_2 = 0.065$) розподіл концентрації солей на різних часових шарах з глибиною змінюється несуттєво – зі збільшенням даних коефіцієнтів розподіл концентрації зростає. Значно інтенсивніше на розподіл концентрації солей впливає зміна коефіцієнта фільтрації – зі збільшенням коефіцієнта фільтрації зростають значення розподілу концентрації солей. Зі збільшенням коефіцієнта пористості ґрунту концентрація солей інтенсивніше перерозподіляється по області фільтрації. Вплив звичайного осмосу на розподіл концентрації солей не значний, це пов'язано з тим, що коефіцієнт осмосу приймає малі значення.

6. Висновки. В роботі проведено математичне моделювання процесу масоперенесення при фільтрації і вологоперенесенні сольових розчинів в областях повного та неповного насичення. Числові розв'язки відповідних крайових задач отримано методом скінченних різниць. Розроблено відповідне програмне забезпечення, з використанням якого проведено числові експерименти та зроблено їх аналіз.

Список використаних джерел

1. Verigin N.N., Sherzhukov B.S. Diffusion and mass exchange during filtration of liquids in porous media. //Development of researches on theory of filtration in USSR (1917-2967).– Moscow: Nauka, 1969. – P. 237-313. [in Russian]
2. Lyashko I.I. Optimization and mathematical modelling of mass transfer of ground waters. – K.: Naukova Dumka, 1998. –P. 256. [in Ukrainian]
3. Lyashko I.I., Demchenko L.I., Mistetskii G. E. Numerical Solution of Problems of Heat and Mass Transfer in Porous Media. – Kiev: Naukova Dumka, 1991. – P. 262. [in Ukrainian]
4. Sergienko I. V., Skopetskii V. V., Deineka V. S. Mathematical Modeling and Investigation of Processes in Inhomogeneous Media. – Kiev, Naukova Dumka, 1991. – 432. [in Ukrainian]
5. Gusev Ye. M. Problems of theory of liquid transfer in non-saturated porous media // Physics of ground waters. – Moscow: Nauka, 1981. – P. 158. [in Russian]
6. Dautov R.Z., Yegorov A.G. Modeling of instability of moisture transfer in non-saturated porous media // Researches in applied mathematics. Kazan. Publ. House of Kazan univ. Iss. 24. – 2004. [in Russian]
7. Samarskii A.A. Theory of Difference Schemes. – Moscow: Nauka, 1989. – P. 616. [in Russian]
8. Vlasyuk A.P., Tsvetkova T.P. Mathematical modelling of mass transfer of salts under joint filtration and moisture transfer in saturated-non-saturated soils in non-linear statement // Theses of XVII International conference “Adoption of decisions under conditions of indeterminacy” – Skhidnytsya, 2011. – P. 48-50. [in Ukrainian]
9. Vlasyuk A.P., Tsvetkova T.P. Mathematical model of the mass transfer during the filtration and the moisture transfer of salt solutions in full and partial saturation soils // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Series Physics & Mathematics. Issue 1. – 2012.– P. 137-144. [in Ukrainian]
10. Tsvetkova T.P. Mathematical modelling of mass transfer taking into account osmosis and moisture transfer in one-dimensional case // IV Intern. Scien. Conf. “Present-day problems of mathematical modelling, forecasting and optimization”, Series: Technical sciences. Issue 4. Collected research papers. – Kamianets-Podilsky NU named after I. Ohienko, 2010. – 227-233 p. [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 01.03.2013