

## **МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ВЕРТИКАЛЬНОГО СОЛЕПЕРЕНОСУ НА ШАХТНИХ ВІДВАЛАХ ЗАХІДНОГО ДОНБАСУ**

На основі теорії фізико-хімічної гідродинаміки пористих середовищ запропоновано ряд варіантів математичних моделей вертикального солепереносу на шахтних відвалах Західного Донбасу. Розраховано кілька варіантів відвалів вільного заростання для вибору оптимального за показниками транспірації диких рослин.

*Ключові слова:* математична модель, солеперенос, міграція, коефіцієнт.

На основе теории физико-химической гидродинамики пористых сред предложено ряд вариантов математических моделей вертикального солепереноса на шахтных отвалах Западного Донбасса. Рассчитано несколько вариантов отвалов свободного зарастания для выбора оптимального за показателями транспирации диких растений.

*Ключевые слова:* математическая модель, солеперенос, миграция, коэффициент гидродисперсии.

On the based theory of physical-chemical hydrodynamics of porous media offer a range of mathematical models of vertical salt transfer on mine dumps Western Donbass. designed several variants of dumps free overgrowth for the optimal performance for transpiration of wild plants.

*Key words:* mathematical models, salt transfer, migration, coefficient of hydrodispersion.

**Вступ.** Західний Донбас – важливий гірничодобувний регіон України. Основні запаси вугілля знаходяться у заплаві ріки Самари, видобуток якого відбувається без забутовки. Добуті із гірських виробок породи відсипають на поверхні землі, заповнюючи ними природні та техногенні зниження рельєфу. Ділянки з насипними породами для сільськогосподарського використання є непридатними, їх необхідно рекультивувати.

Геологічна будова району представлена породами від архей-протерозойського дочетвертинного віку. Вона сприяє розповсюдженню та поповненню підземних вод.

На досліджуваній території розповсюджено 10-12 водоносних комплексів та горизонтів, які безпосередньо зв'язані між собою.

Породи усіх відвалів являються однотипними за хімічним складом і складаються переважно з глинистих мінералів та гідроокисів, з домішками воднорозчинних солей.

Об'єктом дослідження є шахтні відвали вільного заростання ділянки Дніпропетровського державного аграрного університету, що представляють собою вирівняну площину близько 5 га і розташовані на схилі ріки Самари та у заплаві на землях природоохоронної території. На шахтну породу здійснено насип завтовшки по 100 см (1 м):

- а) суміші, лучного, болотного чорнозему;
- б) червоно-бурої глини.

Рослини першої стадії самозаростання характеризуються як бур'янисті. Загальне проективне покриття для ділянок з насипним чорноземом складає 50% для ділянок з насипною глиною – 5 %.

Моделі вертикального солепереносу побудовані на основі теорії фізико-

хімічної гідродинаміки пористих середовищ. На побудованих моделях було виконано такі розрахунки: кількісна характеристика засолення необводненого шахтного відвалу з насипним глинистим шаром в усталеному режимі. При обраній потужності глинистого шару 1м, в усталеному режимі із отриманих результатів розрахунку видно, що на відвалах з середньою засоленістю слід вирощувати рослини з найменшою транспірацією.

Засолення обводненого шахтного відвалу в усталеному режимі: перший розрахунок було виконано, коли рівень ґрунтових вод знаходився на глибині 1 м. На поверхні насипного глинистого шару засолення становило 0,662% (середній ступень). Таке засолення витримують дики рослини.

У другому розрахунку рівень ґрунтових вод було понижено від попереднього рівня ще на 0,5 м.

Засолення на поверхні насипного глинистого шару склало 0,342%. Такі умови для рослин є більш сприятливими ніж у попередньому розрахунку, оскільки усі дики рослини витримують таке засолення.

Третій розрахунок був проведений при глибині залягання рівня ґрунтових вод 1,8 м. Він показав, що засолення у глинистому шарі не буде відбуватися. Ґрунти не переходять до ступеню слабозасолених.

**Метою** роботи є вибір оптимального варіанту рекультивованого шахтного відвалу вільного заростання та створення природоохоронних заходів гідрогеологічного напрямку, які треба починати з поліпшення структури режимної спостережної сітки.

**Методи дослідження.** Задачі розв'язані на моделях вертикального солепереносу аналітичними та чисельними методами.

**Викладення основного матеріалу.** На основі теорії фізико-хімічної гідродинаміки пористих середовищ створені математичні моделі вертикального солепереносу на шахтних відвалах чотирьох типів [5] для кількісної оцінки міграції макрокомпонентів в часі і просторі: з відсіпкою без рекультивації, рекультивація в умовах богарного землеробства, рекультивація з систематичним зрошенням та в умовах природного заростання.

Видобуток вугілля у Західному Донбасі відбувається без забутовки. Видобуті із гірських виробок породи у різному ступені засолені, відсіпають на поверхню землі, заповнюючи природні і техногенні зниження рельєфу. Для сільського господарства такі ділянки непридатні без покриття їх родючим шаром.

Згідно з теорією фізико-хімічної гідродинаміки пористих середовищ процеси солепереносу описуються рівнянням руху і збереження маси речовини другого порядку у часткових похідних [1].

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} = n \frac{\partial C}{\partial t}, \quad (1)$$

$$D = D_m + \lambda V, \quad (2)$$

де  $D$  – коефіцієнт гідродисперсії, м<sup>2</sup>/добу;

$C$  – мінералізація підземних вод в зоні повного водонасичення; мінералізація ґрунтового розчину в зоні аерації, г/дм<sup>3</sup>;

$V$  – швидкість фільтрації в зоні повного водонасичення;  $i$  швидкість вертикального вологопереносу в зоні аерації м/добу;  $V = V_1 - V_2$ ;

$V_1$  – швидкість висхідного потоку, м/добу;

$V_2$  – швидкість нисхідного потоку, м/добу;  
 $x$  – просторова координата м;  $t$  координата часу, доба.  
 $n$  – активна пористість в зоні повного водонасичення; об’ємна вологість в зоні аерації, частки одиниць.  
 $\lambda$  – параметр розсіювання речовини, м.

На шахтних відвалах усіх виділених типів переважає вертикальний солеперенос і доказана лінійна залежність між вмістом розчинених солей в порових розчинах, (г/дм<sup>3</sup>) і засоленістю порід у відсотках щільності сухого ґрунту [4].

Натурні дослідження на ділянках шахтних відвалів четвертого типу на теперішній час проводить Агроуніверситет. Подальші прогнозні розрахунки виконані з такими вихідними даними [9]: Для глин  $D_m$  змінюється від  $(1:9) \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/добу. Для чорноземів – від  $(9:10) \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/добу. Середнє засолення шахтних відвалів  $C_0=0,6$  %. В природних умовах при відсутності рослинності середнє багатовікове значення інфільтраційного живлення для Західного Донбасу складає  $V_2=2,54 \cdot 10^{-5}$  м/добу [3]. Розрахунок виконується для гіршого варіанту, коли транспірація диких рослин максимальна, і складає  $V_1=3 \cdot 10^{-4}$  м/добу. У глинах розсіювання відбувається на молекулярному рівні тому  $D_m=9 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/добу. Приведена мінералізація атмосферних опадів  $C_2=0,0026\%$ . Для розрахунку в умовах усталеного режиму використовуємо аналітичне рішення рівняння вертикального солепереносу Авер’янова С.Ф. [1], за методикою Горєва Л.Н. [2].

$$C = (C_0 + \frac{C_2 V_2}{V_1 - V_2}) \exp \frac{(x_1 - x)(V_1 - V_2)}{D_m} - \frac{C_2 V_2}{V_1 - V_2}, \quad (3)$$

де  $C_0$  – мінералізація ґрунтового розчину у шахтних відвалах, %;  
 $C_2$  – мінералізація води, яка надходить з опадами і поливною водою, %;  
 $x$  – відстань від початку координат до випробуваної точки, м;  
 $x_1$  – потужність шару глини, м;  
 $D_m$  – коефіцієнт молекулярної дифузії, м<sup>2</sup>/добу.

Засоленість на поверхні розраховується за формулою (3)

$$C = (0,6 + \frac{0,0026 \cdot 1,12 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-4} - 2,54 \cdot 10^{-5}}) \exp \frac{(1-0)(3 \cdot 10^{-4} - 2,54 \cdot 10^{-5})}{9 \cdot 10^{-5}} - \frac{0,0026 \cdot 2,54 \cdot 10^{-5}}{3 \cdot 10^{-4} - 2,54 \cdot 10^{-5}} = 12,69\%$$

Результати розрахунку для інших точок зони аерації наведені в таблиці 1 і на рисунку 1.

Таблиця 1

**Розрахунок вторинного засолення необводненого відвалу вільного заростання потужністю 1 м.**

Засолення шахтних відвалів, $C_0$ , %	Мінералізація атмосферних опадів $C_2$ , %	Максимальна транспірація $V_1$ , м/добу	Інфільтраційне живлення $V_2$ , м/добу	Коефіцієнт гідродисперсії $D$ м/добу <sup>2</sup>	Потужність зони аерації $x_1$ , м	Відстань від початку координат до випробуваної точки $x$ , м	Вторинне засолення $C$ , %
1	2	3	4	5	6	7	8
						0	12,69
						0,1	9,35
						0,2	6,89

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7	7
0,6	0,0026	$3 \cdot 10^{-4}$	$2,54 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$	1	0,1	9,35
						0,2	6,89
						0,3	5,08
						0,4	3,74
						0,5	2,76
						0,6	2,03
						0,7	1,50
						0,8	1,10
						0,9	0,81
						1	0,60

При обраній потужності глинистого шару 1м, в усталеному режимі із отриманих результатів розрахунку видно, що на відвалах з такою високою засоленістю, не будуть рости дикі рослини.

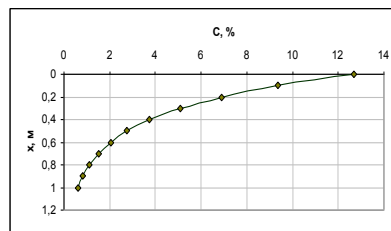


Рисунок 1 – Графік залежності величини вторинного засолення C від глибини x.

Для варіанту обводнених відвалів вільного заростання випаровуваність з поверхні ґрунтових вод являється негативним фактором, так як призводить до збільшення мінералізації і засоленню ґрунту, до зниження родючості. Інтенсивність випаровуваності ґрунтових вод тісно пов'язана з глибиною залягання, висотою капілярного підняття, кліматичними умовами району, рослинним покривом, агротехнічними прийомами обробки ґрунту. Інтенсивність випаровуваності зменшується з підвищенням концентрації солей у ґрунтових водах у зв'язку з зростанням їх в'язкості. Величину випаровуваності з рівня ґрунтових вод можна оцінити по залежності Аверьянова С.Ф. [1]

$$U = U_0 \left(1 - \frac{z}{z_k}\right)^n, \quad (4)$$

Де U – інтенсивність випаровуваності з поверхні ґрунтових вод при глибині залягання z, м;

$Z_k$  – критична глибина, м;

$U_0$  – інтенсивність випаровування з водної поверхні, мм;

n – показник ступеню, що залежить від виду і структури ґрунтів, змінюється в межах від 1 до 3. У нашому випадку приймаємо середнє значення 1,5.

Значення випаровуваності метеостанції Павлоград беремо з таблиці [6] за рік випаровування склало 718,65 мм. Переводимо випаровуваність за рік ( $U_0$ ) у м/добу:

$$U_0 = \frac{718,65}{365 \cdot 1000} = 0,002 \text{ м/добу}$$

Критична глибина випаровування важких суглинків приймаємо за таблицею [7]  $Z_k=2\text{м}$ , тому що шахтні відвали важко суглинисті породи. Вода, яка залягає у відвалах, поступово рухається вгору до глин. При глибині залягання  $Z=1\text{м}$ , як прийнято у фізичних моделях досліду Агроуніверситету.

Визначаємо випаровуваність з поверхні ґрунтових вод підставивши дані у формулу (4):

$$U = 0,002 \cdot \left(1 - \frac{1}{2}\right)^{1,5} = 0,0007 = 7 \cdot 10^{-4} \text{ м/добу}$$

Розраховуємо швидкість вертикального вологопереносу для глибини залягання 1м. Так, як рослини затіняють поверхню відвалів, величина транспірації може бути меншою. [3]

Мінімальна транспірація складає  $0,3 \cdot 10^{-4}$  м/добу [9].

$$V_1 = T + U, \quad (5)$$

де  $T$  – транспірація, м/добу.

Підставляємо дані у формулу (5):

$$V_1 = 7 \cdot 10^{-4} + 0,3 \cdot 10^{-4} = 7,3 \cdot 10^{-4} \text{ м/добу}$$

Оскільки відбір і хімічний аналіз порових розчинів легкорозчинних солей відноситься до найбільш важких і дорогих досліджень, то їх виконують здебільшого у незначних кількостях для встановлення лінійної залежності між мінералізацією порового розчину і загальним вмістом солей породного відвалу. Визначаємо мінералізацію ґрунтових вод за формулою [3]

$$C_1 = A \cdot C + B, \quad (6)$$

де  $C_1$  – мінералізація порового розчину, що рухається, %, г/дм<sup>3</sup>;

$A$  і  $B$  – постійні коефіцієнти для даного типу засолення, так як засолення сульфатне, то  $A=20,8$ ;  $B=0,9$ ;

$C$  – засолення відвалу 0,6% [9].

$$C_1 = 20,8 \cdot 0,6 + 0,9 = 11,58 \text{ г/дм}^3.$$

Переводимо отримане значення у % за формулою Мінашиної Н.Г [8]

$$C_{п.ф} = \frac{C_1 \cdot m \cdot 100}{\rho \cdot 100} = \frac{11,58 \cdot 0,23 \cdot 100}{1760} = 0,15 \%, \quad (7)$$

де  $\rho$  – щільність сухої породи 1,76 г/см<sup>3</sup>;

$m$  – об'ємна вологість 0,23 частки одиниць

Засоленість глин складає 0,07% за даними Агроуніверситету [9]

Для визначення коефіцієнта гідродисперсії використовуємо формулу: Авер'янова С.Ф. [1].

$$D = \frac{V\Delta x}{2\ln\left(\frac{C_x}{C_0}\right)}, \quad (8)$$

де  $C_0$  – засоленість порід (або мінералізація ґрунтових розчинів) при  $x=0$ ;  
 $C_x$  – мінералізація у точці з координатою  $x$ , м;  
 $\Delta x$  – потужність зони аерації, м.

Розрахунок проводимо для мінералізації підземних вод 0,15%. Підставляємо одержані дані у формулу (8)

$$D = \frac{7,3 \cdot 10^{-4} \cdot 1}{2\ln\left(\frac{0,15}{0,07}\right)} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{добу}$$

Для визначення величини вторинного засолення в усталеному режимі використовуємо вже добре відому формулу Горєва (3). Дані, які отримані з попередніх розрахунків, підставляємо у формулу.

$$C = \left(0,15 + \frac{0,07 \cdot 2,54 \cdot 10^{-5}}{7,3 \cdot 10^{-4} - 2,54 \cdot 10^{-5}}\right) \exp\left(\frac{(1-0)(7,3 \cdot 10^{-4} - 2,54 \cdot 10^{-5})}{5 \cdot 10^{-4}}\right) - \frac{0,07 \cdot 2,54 \cdot 10^{-5}}{7,3 \cdot 10^{-4} - 2,54 \cdot 10^{-5}} = 0,662 \%$$

Розрахунок 1м насипного шару глини, коли рівень ґрунтових вод знаходиться у підшві шару, представлений у таблиці 2, графічно відображений на рисунку 2.

Таблиця 2

**Розрахунок вторинного засолення необводненого відвалу вільного заростання потужністю 1 м.**

Мінералізація підземних вод, г/дм <sup>3</sup>	Мінералізація $C_2$ , %	Швидкість вертикального вологопереносу $V_1$ , м/добу	Інфільтраційне живлення $V_2$ , м/добу	Коефіцієнт гідродисперсії $D$ м/добу <sup>2</sup>	Потужність зони аерації $x_1$ , м	Відстань від початку координат до випробуваної точки $x$ , м	Вторинне засолення $C$ , %
0,15	0,07	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$2,54 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$	1	0	0,662
						0,1	0,571
						0,2	0,493
						0,3	0,425
						0,4	0,366
						0,5	0,316
						0,6	0,272
						0,7	0,235
						0,8	0,202
						0,9	0,174
1	0,150						

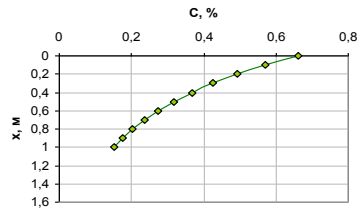


Рисунок 2 – Графік залежності величини вторинного засолення C від глибини x.

На поверхні глинистого шару, при глибині залягання рівня ґрунтових вод у його підшві, засолення складає 0,662 % і відноситься до середнього ступеню. Такі умови витримують дикі рослини.

Знижуємо рівень ґрунтових вод, що складатиме спочатку 1,5 м, а потім 1,8 м. Випаровуваність з поверхні ґрунтових вод за формулою (4) буде складати:

$$\text{Для } 1,5 \text{ м } U = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м/добу}^2.$$

$$\text{Для } 1,8 \text{ м } U = 6 \cdot 10^{-5} \text{ м/добу}^2.$$

Відповідно швидкість вертикального вологопереносу для глибини залягання рівня ґрунтових вод 1,5 м за формулою (5) становитиме  $V_1 = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ м/добу}^2$

$$\text{Для глибини залягання рівня ґрунтових вод } 1,8 \text{ м } V_1 = 9 \cdot 10^{-5} \text{ м/добу}^2$$

Аналогічний розрахунок величини вторинного засолення в усталеному режимі обводненого шахтного відвалу виконуємо спочатку при глибині залягання рівня ґрунтових вод 1,5 м потім 1,8 м.

Результати розрахунку графічно зображені на рисунках 3 та 4.

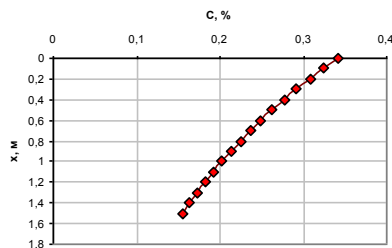


Рисунок 3 – Графік залежності величини вторинного засолення C від глибини x.

При глибині залягання рівня ґрунтових вод 1,5 м у його підшві, на поверхні, рівень засолення складає 0,339 %. Такі умови є більш сприятливими, ніж у попередньому розрахунку. Усі рослини витримують таке засолення.

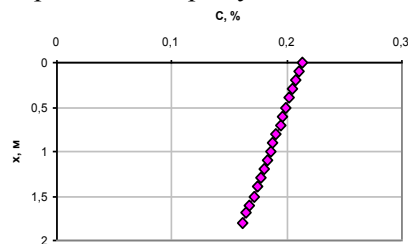


Рисунок 4 – Графік залежності величини вторинного засолення C від глибини x.

Розрахунки показали, що при глибині залягання рівня ґрунтових вод 1,8 м засолення на поверхні становить 0,201 %. При такій глибині ґрунти не переходять до ступеню слабозасолених.

**Висновки:** Проведені розрахунки показали, що для необхідного відвалу в усталеному режимі при максимальній транспірації диких рослин на поверхні засолення дорівнює 12,69%. На відвалах з такою засоленістю слід вирощувати рослини з найменшою транспірацією.

На основі цих розрахунків Агроуніверситетом запропоновані такі види диких рослин, які витримують таке засолення [9]. Домінують будяк акантовидний (*Carduus acanthoides*), молочай польовий (*Euphorbia agraria*), хрінниця звичайна (*Lepidium ruderale*), лобода біла (*Chenopodium album*), спориш звичайний (*Polygonum aviculare*), жовтий осот городній (*Sonchus oleraceus*), березка польова (*Convolvulus arvensis*) і інш.

Для обводненого відвалу засолення суттєво залежить від глибини залягання рівня ґрунтових вод і випаровуваності.

Перший розрахунок було виконано, коли рівень ґрунтових вод знаходився на глибині 1 м. На поверхні насипного глинистого шару засолення становило 0,662% (відноситься до середнього ступеню). Таке засолення витримують окремі види диких рослин з зниженням родючості.

У другому розрахунку рівень ґрунтових вод було понижено від попереднього рівня ще на 0,5 м. Засолення на поверхні насипного глинистого шару склало 0,342%. Такі умови для рослин є більш сприятливими ніж у попередньому розрахунку, тому що усі дикі рослини витримують таке засолення.

Третій розрахунок був проведений при глибині залягання рівня ґрунтових вод 1,8 м. Він показав, що засолення у глинистому шарі не буде відбуватися на такій глибині. Ґрунти не переходять до ступеню слабозасолених.

#### Бібліографічні посилання

1. Аверьянов С. Ф. Борьба с засолением орошаемых земель.– М.: Колос, 1978. – 288 с.
2. Горев Л.Н. Мелиоративная гидрогеохимия /Л.Н.Горев, В.И.Пелешенко – К.: Вища школа, 1984 – 256 с.
3. Евграфкина Г.П. Влияние горнодобывающей промышленности на гидрогеологические и почвенно-мелиоративные условия территории. – Днепропетровск „Моно-лит”, 2003. – 198 с.
4. Евграфкина Г.П., Забутна В.И., К исследованию солепереноса на шахтных отвалах Западного Донбасса. // Вісник Дніпропетровського університету. – 2006. – №3. – С. 22–24.
5. Евграфкина Г.П., Харитонов Н.Н., Жиленко Н.И. Математические модели вертикального солепереноса на шахтных отвалах Западного Донбасса // Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу. –2008. – С. 167-168.
6. Евграфкина Г.П., Харитонов Н.Н., Жиленко Н.И. Основы стабилизации эколого-мелиоративных условий выращивания сельскохозяйственных культур на рекультивированных шахтных отвалах Западного Донбасса // Металлургическая и горнорудная промышленность. –2006. –№4. – С. 136-138.
7. Кац Д.М. Контроль режима ґрунтових вод на орошаемых землях. – М.: Колос, –1978. – 240 с.



8. Минашина Н.Г. Расчет допустимой минерализации вод для орошения почв. – Почвоведенье. –1979. – №2. – С. 118.

9. Харитонов Н.Н., Евграфкина Г.П., Жиленко Н.И. Оценка перспективных вариантов сельскохозяйственного использования на стационаре в Павлограде (около шахты Павлоградская) № договора 08-151591-4-427, 2008.