

МОДЕЛЮВАННЯ УПРАВЛІННЯ РІВНЕМ ГРУНТОВИХ ВОД СІЛЬСЬКИХ ТЕРИТОРІЙ В УМОВАХ ДІЇ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖУ

В.П. КОВАЛЬЧУК

Запропоновано системну модель управління рівнем ґрунтових вод сільських територій в умовах дії вертикального дренажу, теоретико-емпіричний метод її ідентифікації, проілюстровано ефективність моделі на прикладі свердловини вертикального дренажу в смт Каланчак.

Ключові слова: вертикальний дренаж, модель управління, теоретико-емпіричний метод, ідентифікація моделі, критерії управління і ефективності

Постановка задачі управління РГВ на території. Управління рівнем ґрунтових вод на сільській території необхідно класифікувати як управління поведінкою [1]. Його ціль полягає в досягненні в процесі управління таких значень рівнів ґрунтових вод у межах території, що захищається від підтоплення, які відповідають або кращі нормативних. Тому для оцінки ефективності управління застосовується критерій:

$$h(x, y) - h_{кр} \geq 0, \forall x, y \in D_{xy}, \quad (1)$$

де $h_{кр}$ – критичне значення РГВ на даній території; $h(x, y)$ – фактичне значення РГВ від поверхні землі; D_{xy} – територія, що захищається системами інженерного захисту.

Крім критерію управління, задача управління використовує модель динаміки стану об'єкта. Оскільки об'єктом управ-

© В.П. Ковальчук, 2010

лінійна є рівень ґрунтових вод, то його динаміку на певній території доцільно визначити через функцію пониження РГВ $S_n = f(r, t)$ при роботі вертикального дренажу.

Оскільки в процесі управління функція $h(x, y)$ може бути меншою $h_{кр}$, то критерій управління доцільно вибрати у вигляді часток підтоплених площ з деякими ваговими коефіцієнтами, які характеризують сумарний відносний ризик підтоплення території

$$F_1(S_1, S_2, \dots, S_n) = \sum_{i=1}^n \mu_i \frac{S_i}{S}, \quad (2)$$

а ціль управління полягає в мінімізації критерію (2) шляхом зменшення підтоплюваних площ.

Важливими критеріями є зважена комбінація різних площ, яка оцінюється функцією зменшення абсолютного ризику з ваговими коефіцієнтами

$$F_2(S_1, S_2, \dots, S_n) = \sum_{i=1}^5 \mu_i (S_i^{(1)} - S_i^{(2)}) \quad (3)$$

або функцією зменшення відносних ризиків

$$F_3(S_1, S_2, \dots, S_n) = \sum_{i=1}^n \mu_i \left(\frac{S_i^{(1)}}{S} - \frac{S_i^{(2)}}{S} \right), \quad (4)$$

де μ_1, μ_2, μ_3 – відповідні вагові коефіцієнти катастрофічного, стійкого та критичного ризиків підтоплення.

Функції (2–4), які будуються на основі діаграм і гістограм, описують процес управління як аналітично, так і графічно, забезпечують візуалізацію даного процесу управління рівнем ґрунтових вод.

Модель управління рівнем ґрунтових вод сільських територій в умовах дії дренажу (вертикального, горизонтального, комбінованого) має комплексний, системний характер [2] і полягає у використанні послідовності методів та моделей:

- ідентифікації моделей обернених задач на основі даних спостережень та розрахунку понижень РГВ за параметрами моделей стану території;

- побудові карт рівнів ґрунтових вод з використанням розрахункових методів та експериментальних досліджень за РГВ для візуалізації стану системи;
- побудові статистичних оцінок розподілу РГВ за гістограмами (діаграмами) для кількісних і якісних оцінок стану системи;
- системній оцінці роботи дренажної свердловини за критеріями ефективності (технологічними, економічними, екологічними, соціальними).

Теоретико-емпіричний метод побудови системної математичної моделі дренажної свердловини для оцінки її ефективності. Метод ідентифікації моделі полягає в тому, що теоретичні положення знаходять у вигляді розв'язку математичної моделі, що описує водоносний пласт, в який перетікання відсутнє, а параметри цієї моделі (у вигляді моделі Тейса, Хантуша) визначають на основі розв'язування обернених задач за даними виробничих відкачок дренажних свердловин.

Теоретичний розв'язок залежності понижень РГВ в часі і просторі знаходять у вигляді формули Тейса [3–5]

$$S = - \frac{Q}{4 \pi T} Ei(-x), \quad (5)$$

де $Ei(-x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy$ — функція свердловини від x для шарів, у які перетікання не відбувається.

Для ідентифікації моделі контролю і управління на об'єкті, дренажній свердловині ДНС 4, від деякого початкового значення t_0 (початку виробничих відкачувань) ведуться спостереження за рівнями ґрунтових вод та напору пліоценового горизонту в процесі виробничих відкачувань. Наявний куш спостережних свердловин $r = 280$ м, №139 (пліоценовий горизонт) та №139а (верхній малопроникний горизонт), за якими ведуться вимірювання Каланчацьким УВГ і Каховською гідрогеолого-меліоративною експедицією. Додатково нами було обладнано спостережні свердловини тільки у верхньому четвертинному горизонті на різних віддальх r від збудованої

(дренажної) свердловини ДНС 4 ($r = 10$ м, $r = 70$ м), а також на відстані 85 м (бур.11), де проводилось контрольне вимірювання.

Емпіричну інформацію, яку одержано в процесі спостережень за РГВ та напором у пліоценовому горизонті свердловини вертикального дренажу ДНС4 (рис. 1), використовували для побудови математичної моделі залежності понижень S_n в часі для різних віддалей $r = 10, 70$ і 280 м.

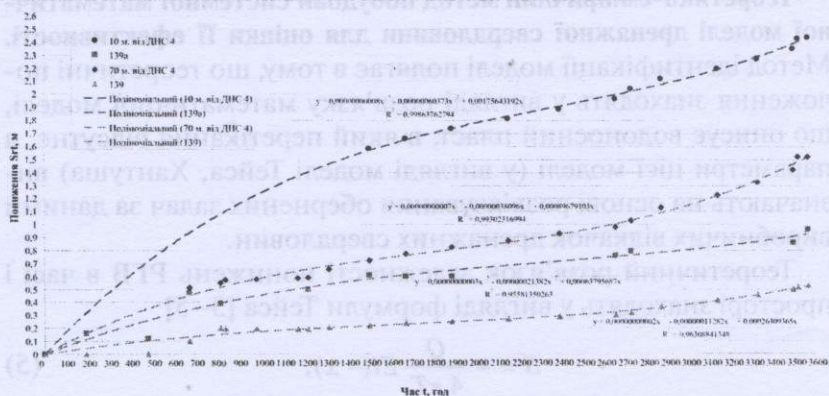


Рис. 1. Залежність понижень S_n у спостережних свердловинах за даними виробничих відкачувань ДНС 4 на різні моменти часу

Суть запропонованого нами теоретико-емпіричного методу полягає у тому, що параметри i та a в кожний момент часу t є змінними і залежать також від радіуса r . Тому при $10 \text{ м} \leq r \leq 280 \text{ м}$ для розрахунку пониження за даними виробничих відкачувань використовується формула Тейса [4], модифікована нами у вигляді:

$$S_n = i_n \left[-E \left(-\frac{r^2}{4at} \right) \right] \approx i_n \ln 2,25 \frac{a_n \cdot t}{r^2}, \quad (6)$$

де $i = i_n$ та $a = a_n$ знаходять емпірично, на основі розв'язування обернених задач за даними виробничих відкачувань у кожній точці процесу.

Методика розрахунку параметрів математичної моделі. На основі даних вимірювань понижень S_n розраховано $a(r, t)$ та $i(r, t)$ за формулою Тейса та проведено апроксимацію параметрів $a(r, t)$ та $i(r, t)$ на проміжку $r \in [10, 280]$. На основі проведених досліджень виявлено (табл. 1), що найкраще наближення для обчислення $a(r, t)$ та $i(r, t)$ дає показникова функція ($R^2 \approx 0,99$).

У табл. 1 та графічно показано залежність $a(r, t)$ від відстані до свердловини r для різних моментів спостереження $t = 240, 480, \dots, 3600$ і трендову апроксимацію показниковою функцією параметра $i(r, t)$ (рис. 2). При цьому середній коефіцієнт кореляції $R^2 \approx 0,83$.

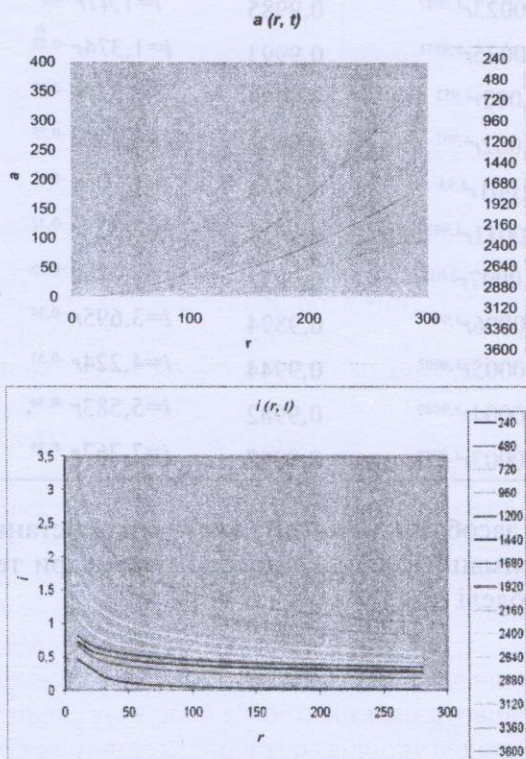


Рис. 2. Трендова апроксимація $a(r, t)$ та $i(r, t)$

1. Результати апроксимації показниковою функцією значень параметрів $a(r, t)$ та $i(r, t)$

Т	$a(r, t)$		$i(r, t)$	
	a	R^2	i	R^2
1	2	3	4	5
240	$a = 0,0043r^2$	1	$i = 11,67r^{-1,19}$	0,8074
480	$a = 0,0028r^{1,9997}$	0,9998	$i = 1,701r^{-0,4}$	0,9999
720	$a = 0,0023r^{1,9985}$	0,9994	$i = 1,645r^{-0,34}$	0,9773
960	$a = 0,0022r^{1,995}$	0,9989	$i = 1,571r^{-0,31}$	0,9325
1200	$a = 0,0023r^{1,9887}$	0,9985	$i = 1,47r^{-0,3}$	0,8972
1440	$a = 0,0025r^{1,9751}$	0,9993	$i = 1,374r^{-0,28}$	0,9009
1680	$a = 0,002r^{1,952}$	0,9998	$i = 1,321r^{-0,27}$	0,9576
1920	$a = 0,002r^{1,907}$	0,9678	$i = 1,449r^{-0,25}$	0,7922
2160	$a = 0,001r^{1,93}$	0,9641	$i = 1,706r^{-0,27}$	0,7083
2400	$a = 0,0011r^{1,9922}$	0,9726	$i = 2,337r^{-0,32}$	0,7115
2640	$a = 0,0007r^{2,027}$	0,9832	$i = 3,216r^{-0,35}$	0,7453
2880	$a = 0,0006r^{1,9948}$	0,9894	$i = 3,695r^{-0,34}$	0,7376
3120	$a = 0,0005r^{1,9697}$	0,9944	$i = 4,224r^{-0,33}$	0,7514
3360	$a = 0,0004r^{1,9849}$	0,9982	$i = 5,583r^{-0,34}$	0,8332
3600	$a = 0,0003r^{1,9949}$	0,9997	$i = 7,267r^{-0,35}$	0,9059

Обчислені засобами Microsoft Excel з використанням трендових апроксимацій у табл. 2 подано параметри теоретико-емпіричної моделі (6).

2. Результати розрахунків коефіцієнтів понижень та фільтраційних параметрів T і a за даними виробничих відкачувань ДНС №4, вимірювань у спостережних свердловинах №139а і №139, № 6 і № 9, смт

Каланчак

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Спостережна свердловина. Горизонт, віддаль від ДНС 4	Момент часу від початку роботи, год	t_i	240	480	720	960	1200	1440	1680	1920	2160	2400	2640	2880	3120	3360	3600
	Відносний момент часу	t	$1t$	$2t$	$3t$	$4t$	$5t$	$6t$	$7t$	$8t$	$9t$	$10t$	$11t$	$12t$	$12t$	$13t$	$15t$
Бурова № 6, четвертинний, $r = 70$ м	Пониження (з апроксимації)	S_n , м	0,194	0,350	0,474	0,572	0,648	0,71	0,762	0,811	0,862	0,922	0,995	1,088	1,207	1,357	1,544
	Кутовий коефіцієнт $i = \frac{S_n - S_{n-1}}{n(t_n - t_{n-1})}$	i	0,2253	0,3054	0,3382	0,3430	0,3376	0,3397	0,3666	0,4358	0,5646	0,7703	1,0704	1,4822	2,0231	2,7104	3,5614
	Коефіцієнт п'єзопровідності	a , м ² /год	21,49	14,29	12,29	12,01	12,37	12,21	10,36	7,29	4,64	3,00	2,09	1,58	1,27	1,07	0,93
	Водопровідність пласта	T , м ² /год	42,39	31,27	28,24	27,84	28,29	28,11	26,05	21,91	16,92	12,40	8,92	6,44	4,72	3,52	2,68

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Бурова №9, четвертинний, r = 10 м	Пониження (з апроксимації)	$S_n, \text{ м}$	0,388	0,713	0,983	1,205	1,385	1,531	1,649	1,747	1,832	1,910	1,989	2,076	2,178	2,302	2,455
	Кутовий коефіцієнт $i = \frac{S_n - S_{n-1}}{\varepsilon n(t_n - t_{n-1})}$	i	0,469	0,665	0,769	0,807	0,799	0,767	0,734	0,719	0,744	0,831	1,001	1,273	1,670	2,212	2,922
	Коефіцієнт п'єзо- провідності	$a, \text{ м}^2/\text{год}$	0,42	0,27	0,22	0,21	0,21	0,23	0,25	0,26	0,24	0,18	0,12	0,08	0,05	0,04	0,03
	Водо- провідність пласта	$T, \text{ м}^2/\text{год}$	20,34	14,34	12,40	11,83	11,95	12,44	13,01	13,28	12,82	11,49	9,55	7,50	5,72	4,32	3,27
№139а, четвертинний, r = 280 м	Пониження (з апроксимації)	$S_n, \text{ м}$	0,141	0,260	0,36	0,442	0,51	0,565	0,611	0,650	0,685	0,717	0,75	0,785	0,826	0,875	0,935
	Кутовий коефіцієнт $i = \frac{S_n - S_{n-1}}{\varepsilon n(t_n - t_{n-1})}$	i	0,007	0,1718	0,2453	0,2862	0,3035	0,3051	0,2986	0,291	0,2915	0,3060	0,3427	0,4089	0,5123	0,6604	0,8606
	Коефіцієнт п'єзо- провідності	$a, \text{ м}^2/\text{год}$	330,3	209,8	170,1	155,7	154,4	160,8	169,0	169,0	151,1	117,7	82,54	56,02	39,02	28,67	22,29
	Водо- провідність пласта	$T, \text{ м}^2/\text{год}$	55,58	38,93	33,36	31,46	31,30	31,99	32,76	32,76	31,20	27,87	23,35	18,64	14,46	11,10	8,52

Отже, на основі експериментальних досліджень, а також теоретико-емпіричних моделей (5)–(6) отримано криві депресії, залежність пониження рівнів ґрунтових вод S_{r1} від відстані до свердловини ДНС 4 (радіуса) r на різні моменти часу t (рис. 3.)

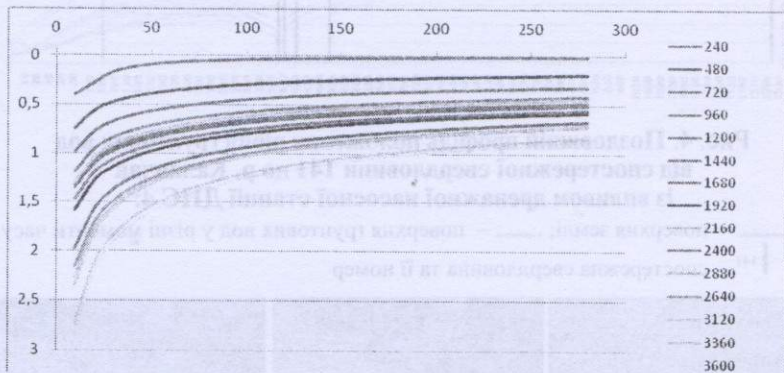


Рис. 3. Залежність пониження рівнів ґрунтових вод S_{r1} від відстані до свердловини для різних моментів спостереження

Модель оцінки ефективності та управління роботою вертикального дренажу (на прикладі смт Каланчак). На основі розрахункових і спостережних значень [6], понижень S_{r1} рівня ґрунтових вод побудовано повздовжні профілі положення рівнів ґрунтових вод (рис. 4) та карти рівнів ґрунтових вод (рис. 5) на різні моменти часу, побудовані С.А. Шевчуком [7]. Карти побудовано на основі розробленого методу [6, 8], оснований на використанні формул гідрогеологічного розрахунку в сітковій моделі. Для даних карт крок комірки становив 2,5 м.

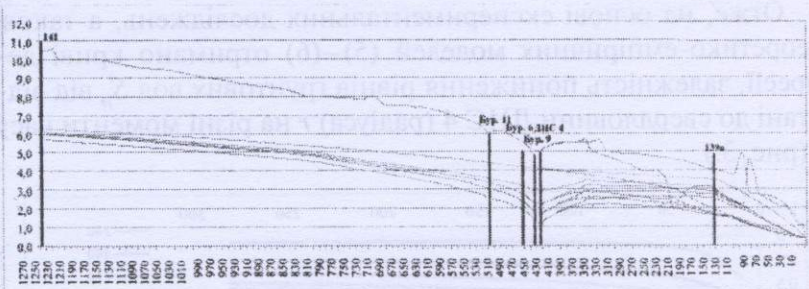


Рис. 4. Поздовжній профіль положення рівня ґрунтових вод від спостережної свердловини 141 до р. Каланчак із впливом дренажної насосної станції ДНС 4:

— — поверхня землі; — — — — — поверхня ґрунтових вод у різні моменти часу;
 141 — спостережна свердловина та її номер

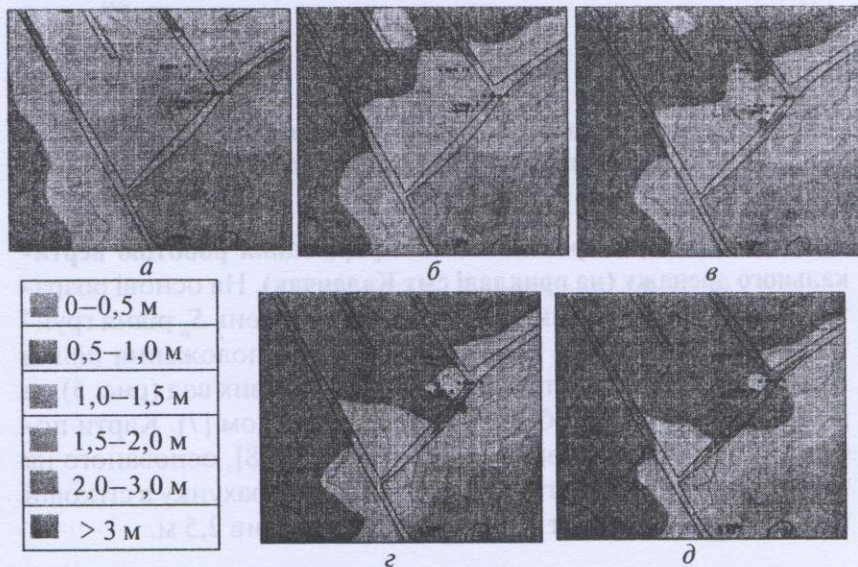


Рис. 5. Карта положення першого від поверхні водоносного горизонту та гідроізопіс для ділянки проведення розрахунків упродовж лютого—липня 2009 р.:

a — станом на лютий 2009 р.; *b* — станом на березень 2009 р.; *в* — станом на квітень 2009 р.; *г* — станом на червень 2009 р.; *д* — станом на липень 2009 р. (розраховано за методикою (С.А. Шевчука))

Для критеріальних оцінок розглянемо діаграму площ з різним рівнем ґрунтових вод на початок досліджень (лютий) та на кінець спостережень (липень) в абсолютному вираженні табл. 3 і рис. 6. Виходячи з візуалізації процесу (побудова карт), проведено кількісні статистичні оцінки – діаграми розподілу рівнів ґрунтових вод (рис. 6), що дає змогу оцінити динаміку покращання еколого-меліоративного стану в результаті роботи свердловини вертикального дренажу ДНС №4.

Розглянемо площі з різним рівнем РГВ, на яких не виконуються нормативні вимоги (на сільськогосподарських угіддях згідно з нормативами РГВ \geq 2 м, на міських територіях \geq 3 м, для лук 0,5–1,5 м) і порівняймо з площами спостережень (липень). Динаміка цих площ характеризує ефективність роботи вертикального дренажу. Отже, якщо не розглядати лугові угіддя та частину земель сільськогосподарського призначення (городи), то характер динаміки рівнів ґрунтових вод (табл. 3.) показує в процесі управління різке зменшення підтоплюваних та близьких до підтоплення площ.

3. Динаміка рівнів ґрунтових вод від початку спостережень (лютий) впродовж п'яти місяців (липень) без врахування площ, зайнятих луками

Лютий	Березень	Квітень	Червень	Липень	РГВ
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	< 0 м
0,82	0,05	0,01	0,01	0,01	0 м – 1 м
2,03	0,91	0,73	0,54	0,06	1 м – 1,5 м
5,45	1,84	1,33	0,62	0,81	1,5 м – 2 м
11,78	9,79	8,51	7,47	5,35	2 м – 3 м
2,97	10,45	12,46	14,40	16,81	> 3 м

Таким чином, проведена апробація показників та елементів системи прийняття рішень стосовно до захисту територій від підтоплення та затоплення показує, що в результаті покращання управління вертикальним дренажем зростають площі, де виконуються нормативні обмеження і зменшуються площі, де нормативи не виконуються. В цілому можна говорити про задовільну роботу вертикального дренажу.

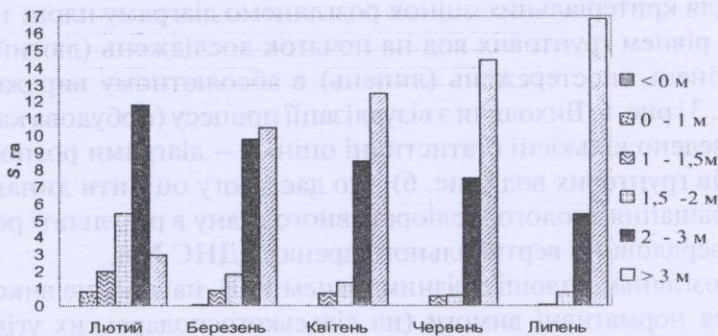


Рис. 6. Діаграма динаміки розподілу площ з різним рівнем залягання ґрунтових вод від початку включення свердловини ДНС 4 (лютий) та впродовж п'яти місяців роботи (липень) без врахування площ, зайнятих луками

Другим критерієм є зважена комбінація різних площ, яка оцінюється функцією абсолютного ризику

$$KET_4 = \sum_{i=1}^5 \mu_i (S_i^{(1)} - S_i^{(2)}) \quad (7)$$

з ваговими коефіцієнтами $\mu_1=1$; $\mu_2=1$, $\mu_3=1$, $\mu_4=0,8$, $\mu_5=0,5$, одержимо $KET_4 = \sum_{i=1}^5 \mu_i (S_i^{(1)} - S_i^{(2)}) = 9,617$ га, тобто площа земель з незадовільним еколого-меліоративним станом зменшилась на 9,617 га.

Висновки. Системна модель управління рівнем ґрунтових вод сільських територій дає змогу за критеріями ризику оцінювати ефективність дії вертикального дренажу з візуалізацією процесу. На основі ГІС-технологій та побудови гістограм (діаграм) розподілу площ з різним рівнем ґрунтових вод послідовно оцінюється процес функціонування системи управління рівнем ґрунтових вод. Модель управління базується на поетапному використанні методів і моделей:

- ідентифікації моделей обернених задач на основі даних спостережень та розрахунку понижень РГВ за параметрами моделей стану територій;

- побудові карт рівнів ґрунтових вод з використанням розрахункових методів та експериментальних досліджень за РГВ для візуалізації стану системи;
- побудові статистичних оцінок розподілу РГВ за гістограмами (діаграмами) для кількісних і якісних оцінок стану системи;
- системній оцінці роботи дренажної свердловини за критеріями ефективності (технологічними, економічними, екологічними, соціальними).

В основу ідентифікації функції пониження РГВ при роботі вертикального дренажу обґрунтовано теоретико-емпіричний метод, який полягає у використанні формули Тейса, в якій параметри знаходять емпірично на основі розв'язування обернених задач за даними виробничих відкачувань у кожній точці процесу. Ефективність моделі управління проілюстровано на об'єкті в смт Каланчак.

1. Згуровський М.З., Панкратова Н.Д. Основи системного аналізу. — К.: Видавнича група ВНУ, 2007. — 544 с.
2. Ковальчук В.П. Вдосконалення управління системами вертикального дренажу на основі ідентифікації моделей фільтрації та критеріальних оцінок // Вісн. УДУВГП. — Рівне, 2009. — Вип. 3(47). — Ч.1. — С.131–143.
3. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. — изд. 2-е. — М.: Наука, 1977. — 664 с.
4. Костоюкович П.Н. Гидрогеологические основы вертикального дренажа. — Минск: Ураджай, 1979. — 287 с.
5. Методические рекомендации по расчетам защиты территорий от подтопления в зоне орошения /под ред. А.Я. Олейника. — К.: Укр-гипроводхоз, 1986. — 392 с.
6. Ковальчук П.І., Шевчук С.А., Ковальчук В.П., Кузьменко В.Д., Марків О.М. Моделювання підтоплення територій за даними натурних спостережень з використанням ГІС-технологій // Таврій. наук. вісн. — Херсон: ТОВ «Айлант», 2008. — Вип. 61. — С. 208–217.
7. Шевчук С.А. Оцінка працездатності й ефективності роботи дренажних систем для прийняття рішень щодо необхідності їх реконструкції та модернізації // Таврій. наук. вісн. — Херсон: ТОВ «Айлант», 2010. — Вип. 72. — С. 105–114.

8. Шевчук С.А. Спеціалізована ГІС моделювання рівнів ґрунтових вод для дослідження процесів підтоплення // 23d European Regional Conference of ICID «Progress in Managing Water for Food and Rural Development», May 17–24, 2009. — Lviv (Ukraine). — 2009. — С. 95.

Предложена системная модель управления уровнем грунтовых вод сельских территорий при действии вертикального дренажа, теоретико-эмпирический метод ее идентификации, проиллюстрирована эффективность модели на примере скважины вертикального дренажа в пгт Каланчак.

It is proposed the system model of groundwater level control for rural areas at vertical drainage operation and the empirical-theoretic method for its identification. It is also illustrated the model efficiency by the example of a vertical drainage well in Kalanchak urban village.