

## **СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МЕЛІОРАЦІЇ**

**УДК 631.67:626.86:624.131.6(255)**

**Ковальчук В.П., к.т.н., докторант, Шевчук С.А., к.т.н.,** (Інститут гідротехніки і меліорації НААН України, м. Київ)

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНОГО ДРЕНАЖУ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

**Для оцінки ефективності систем комбінованого дренажу запропоновано метод системного математичного моделювання рівнів ґрунтових вод при виборі оптимального варіанту захисту території від підтоплення.**

**For the purpose of performance evaluation of combined drainage systems the system mathematical modeling method of groundwater levels at the selection of optimal alternative for flood protection of a territory is proposed.**

**Постановка задачі.** В даний час для боротьби з підтопленням на півдні України використовуються системи вертикального дренажу, які являють собою систему водопонижуючих свердловин, напірних трубопроводів, дренажних гирл та водоприймачів [1]. Вертикальний дренаж є одним з найбільш досконалих стосовно зменшення напору в водоносному горизонті і зниження рівня ґрунтових вод відповідно. Проте вертикальний дренаж за технічними особливостями недостатньо ефективно здійснює водовідведення при випаданні великої кількості атмосферних опадів, тобто є недостатньо ефективним при значному інфільтраційному живленні. Тому для ефективного водовідведення необхідно застосовувати комбінований дренаж, ефективність якого досліджується в даній роботі на основі математичного моделювання. Як об'єкт дослідження вибрано елемент території в районі лікарні смт. Каланчак Херсонської області, де в даний час діє вертикальний дренаж, а також функціонує відкритий горизонтальний дренаж, який потребує реконструкції.

Використання математичного моделювання для вибору варіанту реконструкції забезпечує управління структурою системи захисту від підтоплення [2], тобто адаптацію об'єкта до наявної ситуації через структурну зміну об'єкта внаслідок реконструкції та модернізації дренажних систем.

**Методологія математичного моделювання для оцінки ефективності комбінованого дренажу.**

Задача оцінки ефективності дренажу (вертикального, горизонтального, комбінованого) має комплексний, системний характер [3] і полягає у сценарному моделюванні процесу пониження рівнів ґрунтових вод (РГВ) при використанні послідовності методів і 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 в процесі роботи дренажу;

- системна оцінка роботи дренажної свердловини за критеріями ефективності (технологічними, економічними, екологічними, соціальними).

Теоретико-емпіричний метод ідентифікації моделі полягає в тому, що теоретичні положення знаходять у вигляді розв'язку математичної моделі, а параметри цієї моделі (у вигляді моделі Тейса, Хантуша) визначають на основі розв'язування обернених задач за даними виробничих відкачок дренажних свердловин [3].

Якщо відбувається відкачка води із  $n$  досконалих свердловин, пониження від дії всіх свердловин вертикального дренажу буде рівним сумі понижень, що викликані окремими свердловинами [4]. Методологічно розрахунок кривої депресії при дії комбінованого дренажу здійснюється за принципом сумарного пониження рівнів ґрунтових вод при дії горизонтального і вертикального дренажу. Тому для створення алгоритму розрахунку кривої депресії необхідно розробити алгоритм розрахунку водопониження при дії вертикального дренажу, а також теоретичні положення та алгоритм розрахунку кривої депресії при дії горизонтального дренажу.

Моделювання сумісної дії вертикального і горизонтального дренажу дозволяє оцінити варіанти структур систем захисту з точки зору мінімізації підтоплення, тобто здійснити управління структурою при реконструкції дренажних систем.

**Математичні моделі оцінки функціонування вертикального дренажу на досліджуваній ділянці комбінованого дренажу.**

Для моделювання і розрахунку понижень рівня ґрунтових вод в результаті дії вертикального дренажу за даними виробничих спостережень використано теоретико-емпіричний метод [3]. При неусталеній фільтрації величина пониження  $S_n$  є функцією часу  $t$  в заданій точці радіусу  $r$  [9]. Для моделювання пониження в часі і просторі скористаємось формулами Тейса–Маскета [5].

$$S_n = \frac{Q}{4\pi T} \left[ -E_i \left( -\frac{r^2}{4at} \right) \right] \approx i(t) \frac{2,25 a(t)t}{r^2} \quad , \quad (1)$$

в яких параметри  $a(t)$  та  $i(t)$  залежать від часу.

На вибраній ділянці функціонування вертикального дренажу за даними виробничих відкачок роботи свердловин вертикального дренажу в часі ДНС 5а та ДНС 17 і проведених спостережень РГВ в спостережних свердловинах (відповідно бур. № 7 та №142а) в чвертинних відкладеннях одержані залежності понижень в часі (рис. 1). Базуючись на даних виробничих досліджень, одержані розрахункові параметри  $a(t)$ ,  $i(t)$ , тобто одержані параметри формули Тейса в різні моменти часу  $t$  для дренажних свердловин ДНС №5а та №17, як середні значення на деякому інтервалі спостережень.

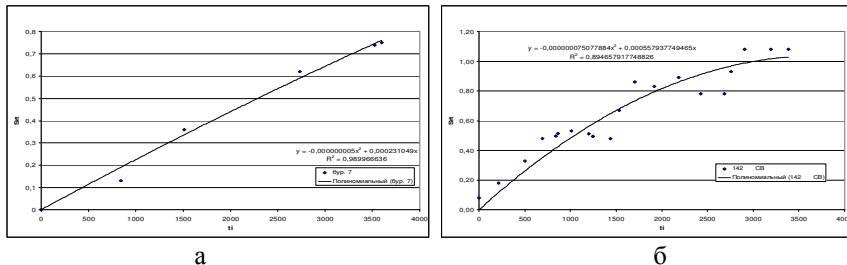


Рис. 1. Залежність понижень РГВ  $S_{r_i}$  в спостережних свердловинах за даними виробничих відкачок дренажних насосних станцій: а – в свердловині №7 при ДНС 5а; б – в свердловині № 142а при ДНС 17

Результати розрахунків параметрів формули (1) за теоретико-емпіричним методом наведені в таблиці. Розрахунок понижень за формулою (1) в результаті роботи свердловини вертикального дренажу подані у вигляді кривих депресії (рис. 2).

Аналіз кривих депресій показує, що дія ДНС № 17 розповсюджується на відстань до 200 м, проте пониження незначні і в процесі роботи в часі ( $t=3600$  год.) змінюються від 0,5 м (на відстані 130 м) до 1,7 м (на відстані 10 м). Пониження від свердловини ДНС 5а за даними спостережень в бур. №7 сягають на південь від свердловини до 50 м і змінюються від 0,5 м до 2,8 м.

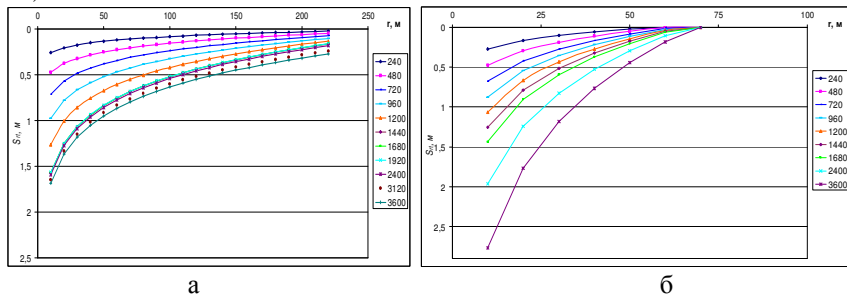


Рис. 2. Результати розрахунків понижень за формулою (1):  
а – в результаті роботи свердловини вертикального дренажу ДНС №17;  
б – в результаті роботи свердловини вертикального дренажу ДНС №5а

**Розрахунок горизонтального дренажу в умовах неоднорідного середовища.** Для оцінки ефективності горизонтального дренажу використовується нелінійне рівняння Буссинеска, вивід якого базується на балансових розрахунках при певних допущеннях [8]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{k}{m} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right] + \frac{\omega_0}{m}, \quad (2)$$

де  $h(x,y,t)$  – вільна поверхня,  $\omega_0$  – вертикальна швидкість на нижній основі пласта при  $z = 0$ .

Таблиця

Результати розрахунків коефіцієнтів понижень та фільтраційних параметрів  $T$  і  $a$  за даними виробничих відкачок ДНС №17 та ДНС №5а, на основі вимірювань в спостережних свердловинах №142а та бур. №7 смт. Каланчак

Спостережна свердловина. Горизонт, віддаль від ДНС	Момент часу від початку роботи, го- дини	$t_i$	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	
№142а, Четвертинний, $r=220$ м	Пониження (з апроксимації)	$S_{n,m}$	0,024	0,050	0,078	0,107	0,139	0,172	0,207	0,244	0,283	0,324	0,366	0,410	0,456	0,504	0,553	
	Кутовий коефіцієнт $i = \frac{S_{r_n} - S_{r_{m-1}}}{\ln(t_n/t_{n-1})}$	$i$	0,03	0,068	0,103	0,141	0,182	0,227	0,227	0,227	0,227	0,227	0,227	0,227	0,227	0,227	0,227	0,227
	Коефіцієнт п'єзопровідності	$a$ , м <sup>2</sup> /год	163,1	89,01	60,90	45,97	36,73	30,46	25,93	22,53	19,87	19,87	19,87	19,87	19,87	19,87	19,87	19,87
	Водопровідність пласта	$T$ , м <sup>2</sup> /год	<b>55,58</b>	<b>38,93</b>	<b>33,36</b>	<b>31,46</b>	<b>31,30</b>	<b>31,99</b>	<b>32,76</b>	<b>32,76</b>	<b>31,20</b>	<b>27,87</b>	<b>23,35</b>	<b>18,64</b>	<b>14,46</b>	<b>11,10</b>	<b>8,52</b>	
№7, Четвертинний, $r=40$ м	Пониження (з апроксимації)	$S_{n,m}$	0,055	0,109	0,163	0,217	0,270	0,322	0,374	0,425	0,475	0,525	0,575	0,623	0,672	0,719	0,766	
	Кутовий коефіцієнт $i = \frac{S_{r_n} - S_{r_{m-1}}}{\ln(t_n/t_{n-1})}$	$i$	<b>0,078</b>	<b>0,133</b>	<b>0,185</b>	<b>0,236</b>	<b>0,286</b>	<b>0,335</b>	<b>0,382</b>	<b>0,429</b>	<b>0,474</b>	<b>0,518</b>	<b>0,561</b>	<b>0,602</b>	<b>0,643</b>	<b>0,682</b>	<b>0,720</b>	
	Коефіцієнт п'єзопровідності	$a$ , м <sup>2</sup> /год	<b>5,96</b>	<b>3,37</b>	<b>2,38</b>	<b>1,85</b>	<b>1,52</b>	<b>1,29</b>	<b>1,12</b>	<b>0,99</b>	<b>0,89</b>	<b>0,81</b>	<b>0,75</b>	<b>0,69</b>	<b>0,64</b>	<b>0,60</b>	<b>0,57</b>	
	Водопровідність пласта	$T$ , м <sup>2</sup> /год	<b>161,7</b>	<b>95,5</b>	<b>68,5</b>	<b>53,7</b>	<b>44,4</b>	<b>37,9</b>	<b>33,2</b>	<b>29,6</b>	<b>26,8</b>	<b>24,5</b>	<b>22,6</b>	<b>21,1</b>	<b>19,7</b>	<b>18,6</b>	<b>17,6</b>	

В подальшому будемо використовувати для розрахунку горизонтального дренажу тільки рівняння усталеного руху. В практичних задачах, зокрема на вибраному об'єкті, коефіцієнт фільтрації слабо проникного шару не є постійним. Верхній слабо проникний шар складається з окремих шарів, що мають різний коефіцієнт фільтрації.

Тому для моделювання роботи відкритого горизонтального дренажу використаємо теоретичні положення [4], розроблені для фільтрації в слабо неоднорідних по вертикалі ґрунтах.

Розглянемо рух вологи в неоднорідних (багатопластових) ґрунтах з вільною поверхнею в ґрунті, коефіцієнт фільтрації якого являється функцією від висоти  $k(z) = f(h)$ . Обчислимо витрату  $q_x$  в напрямку осі  $x$  та витрату  $q_y$  в напрямку осі  $y$  через площадку висоти  $h$  з основною, рівною одиниці, перпендикулярно до осі  $x$  та  $y$ :

$$q_x = -\frac{\partial h}{\partial x} \int_0^h k(z) dz, \quad q_y = -\frac{\partial h}{\partial y} \int_0^h k(z) dz. \quad (3)$$

Виходячи з функції Н.К. Гиринського (потенціалу Гиринського)

$$\Phi(x, y) = \int_0^h (z - h) k(z) dz. \quad (4)$$

одержуються вирази  $q_x$  та  $q_y$ :

$$q_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad q_y = \frac{\partial \Phi}{\partial y}. \quad (5)$$

Якщо ґрунт однорідний, то потенціал Гиринського має вигляд:

$$\Phi(x, y) = k \int_0^h (z - h) dz = -\frac{kh^2}{2}. \quad (6)$$

Функція Гиринського  $\Phi(x, y)$  задовольняє рівнянню Лапласа і представляє узагальнення функції  $-\frac{kh^2}{z}$  на випадок ґрунту, неоднорідного по вертикалі.

Для розрахунку горизонтального дренажу, в якості прикладу неперервної зміни  $k(z)$  з висотою розглянуто випадок лінійної залежності  $k(z) = k_0(1 + bz)$ . Інтегрування рівняння (4) для руху в площині  $x$ , з дає:

$$\Phi(x) = -\frac{k_0 h^2}{2} - \frac{k_0 b h^3}{6}. \quad (7)$$

Вважаючи витрату  $q$  постійною для всіх  $x$  і покладаючи  $D\Phi/dx = q$ , після інтегрування одержимо

$$\Phi = qx + C, \quad (8)$$

де  $C$  – довільна постійна.

Приврівнюючи вирази (7) та (8) при  $C = 0$ , одержимо рівняння

$$-\frac{k_0 h^2}{2} - \frac{k_0 b h^3}{6} = qx. \quad (9)$$

або

$$h^2 + \frac{1}{3}bh^3 = -\frac{2q}{k_0}x. \quad (10)$$

Задання двох точок  $(x_1, h_1)$  і  $(x_2, h_2)$  вільної поверхні дає нам

$$q = -\frac{k_0(h_2 - h_1) \left[ h_2 + h_1 + \frac{b}{3}(h_2^2 + h_1h_2 + h_1^2) \right]}{2(x_2 - x_1)}, \quad (11)$$

де  $(x_1, h_1)$ ,  $(x_2, h_2)$  – експериментальні точки, в яких вимірюються і відомі значення  $h_1$  та  $h_2$ ;  $h$  – висота кривої депресії в точці  $x$ ;  $k_0$  – коефіцієнт фільтрації.

Якщо  $b > 0$ , то коефіцієнт фільтрації зростає з висотою, а абсолютне значення  $q$  більше, ніж при  $b = 0$ ; Якщо  $b < 0$  то  $k$  убуває з висотою, і  $q$  по абсолютній величині менше, ніж при  $b = 0$ .

Дослідження формули вільної поверхні (можна прийняти  $C_1 = 0$ ) показує, що при  $b > 0$  отримується крива, що лежить нижче параболи

$$h^2 = -\frac{2q}{k_0}x. \quad (12)$$

При  $b < 0$  отримується крива можливої форми вільної поверхні.

Для розрахунку дії горизонтального дренажу розроблено алгоритм, який реалізує усталений (рівноважний) процес. Процес дренування території розглядається в деякій області  $D_{xh} = \{x, h \mid x \in [x^{\min}, x^{\max}], h \in [0; h^{\max}]\}$ .

Тоді остаточно, використовуючи (10) та (11), для кривої депресії одержимо рівняння

$$h^2 + \frac{1}{3}bh^3 = q^*x, \quad (15)$$

де

$$q^* = -\frac{(h_2 - h_1) \left[ h_2 + h_1 + \frac{b}{3}(h_2^2 + h_1h_2 + h_1^2) \right]}{(x_2 - x_1)}. \quad (16)$$

Розроблено алгоритм розв'язування рівняння (15) методом знаходження мінімуму функції:

$$F(h, x) = \left| h^2 + \frac{1}{3}bh^3 - q^*x \right| \rightarrow \min_h, \quad (17)$$

тобто методом ітерацій знаходиться  $h$  при кожному  $x$ , що розглядається як параметр. Отже, алгоритм дозволяє проводити розрахунки кривих депресії при дії горизонтального дренажу при різній глибині залягання дрени  $h$  та на різній віддалі  $x$  від дрени.

**Сценарний аналіз для оцінки ефективності комбінованого дренажу.** Розрахунок кривої депресії при дії комбінованого дренажу здійснюється за принципом сумарного пониження рівнів ґрунтових вод при дії горизонтального і вертикального дренажу (рис. 3).

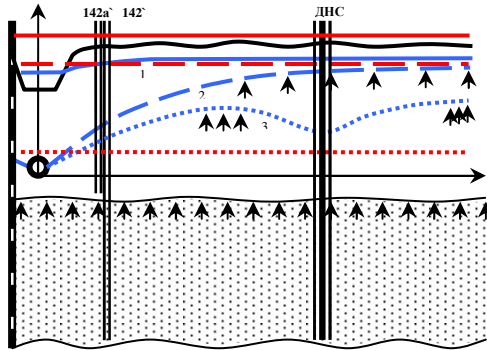


Рис. 3. Положення рівнів ґрунтових вод при дії дренажу:

1. – фактичне положення РГВ.
2. – положення РГВ при роботі горизонтального дренажу глибокого закладання.
3. – положення РГВ при сумісній роботі горизонтального та вертикального дренажу.

— напірний пліщеновий водоносний горизонт  
 — перший від поверхні водоносний горизонт (четвертинний горизонт)

На основі математичного моделювання можна досліджувати положення РГВ окремо при дії тільки горизонтального або вертикального дренажу, при дії комбінованого дренажу в умовах різної глибини залягання горизонтального дренажу. Сценарний аналіз [2] також передбачає на основі математичних розрахунків комбінованого дренажу здійснити візуалізацію процесів (на основі картографічного моделювання) та одержувати кількісні оцінки в вигляді діаграм.

**Картографічне моделювання результатів роботи комбінованого дренажу та аналіз його ефективності на основі діаграм.** На основі розрахункових значень понижень  $S_{\pi}$  рівня ґрунтових вод побудовані гідроізогіпси та карти рівня ґрунтових вод на різні моменти часу (рис. 4), тобто без впливу горизонтального та комбінованого дренажу (вихідний рівень, лютий та липень місяці) та в результаті роботи горизонтального і комбінованого дренажу (рис. 4), діаграми розподілу площ різним РГВ (рис. 5), гідроізогіпси (рис. 6) та повздовжні профілі (рис. 7).

Таблиця 2

Розподіл площ за рівнем ґрунтових вод на лютий та липень місяць і з роботою горизонтального та комбінованого дренажу

Лютий	Липень	Гор. дренаж	Комб. дренаж	РГВ
Площа, га				
4,88	3,84	3,66	3,66	< 0 м
25,25	13,93	11,21	11,17	0 м - 1 м
49,49	35,79	33,41	33,43	1 м - 1,5 м
57,49	45,26	35,72	35,51	1,5 м - 2 м
116,94	103,13	83,68	72,44	2 м - 3 м
204,39	256,49	290,75	302,23	> 3 м

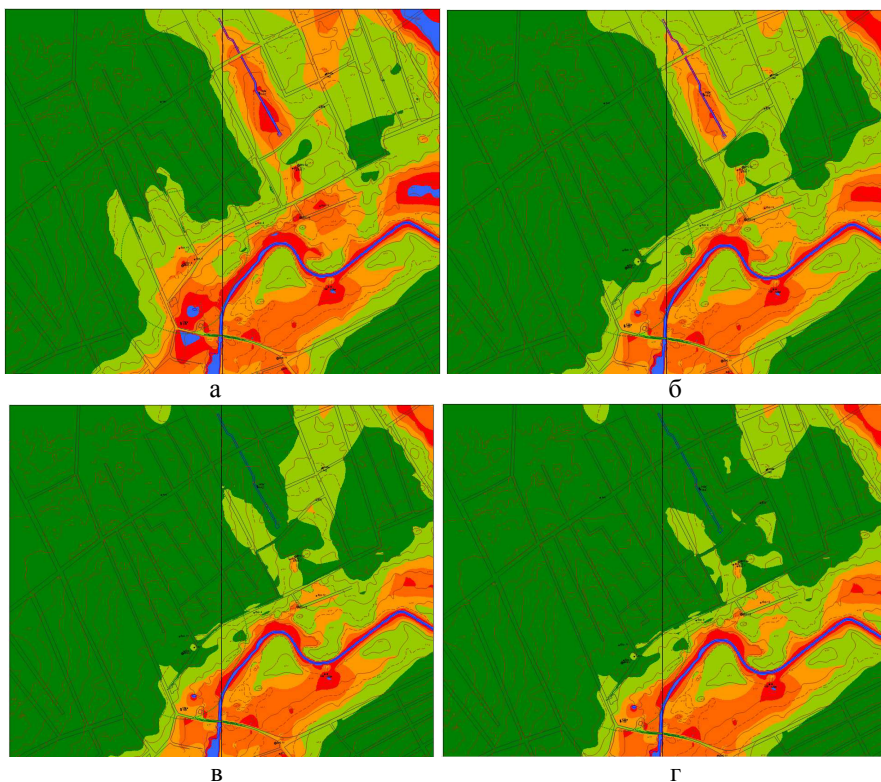


Рис. 4. Карта глибин залягання рівнів ґрунтових вод досліджуваної ділянки:  
 а – лютий місяць; б – липень місяць; в – при роботі горизонтального дренажу глибокого закладання; г – при сумісній роботі горизонтального та вертикального дренажу (коефіцієнт  $b = -0,2$ )

■ 0-0,5 м ■ 0,5-1 м ■ 1-1,5 м ■ 1,5-2 м ■ 2-3 м ■ 3-5 м

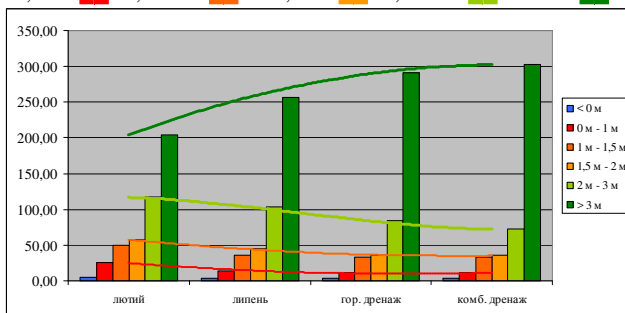


Рис. 5. Діаграма розподілу площ за рівнем ґрунтових вод на лютий та липень місяці (без роботи дренажу) та при роботі горизонтального та комбінованого дренажу, га



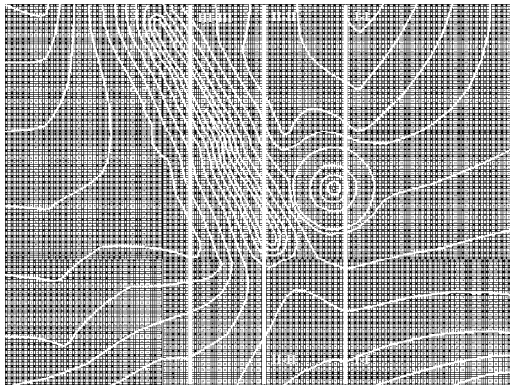
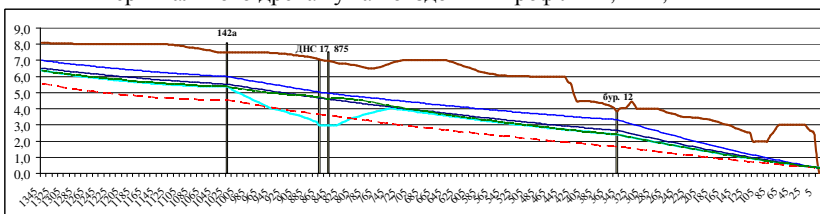
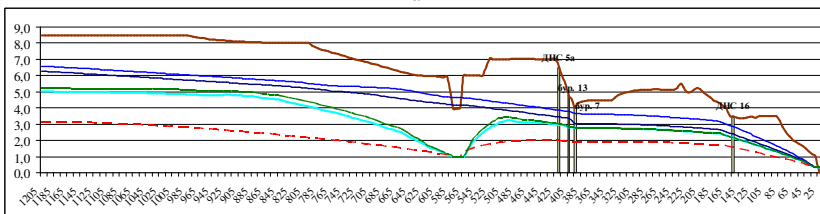


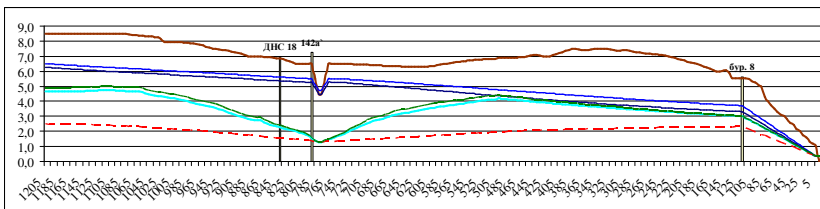
Рис. 6. Положення гідроізогіпс при сумісній роботі горизонтального та вертикального дренажу та повздовжні профілі I-I, II-II, III-III



а



б



в

Рис. 7. Повздовжні профілі для ділянки горизонтального та вертикального дренажу (а – I-I, б – II-II, в – III-III).

- █ Фактичне положення РГВ (лютий - липень).
- █ Положення РГВ при роботі горизонтального дренажу глибокого закладання.
- █ Положення РГВ при сумісній роботі горизонтального та вертикального дренажу

В результаті за розподілом площ РГВ (рис. 5) маємо змогу оцінити при дії комбінованого дренажу величину зменшення площ з рівнем ґрунтових вод до 2 м, від 2 до 3 м і збільшення площ  $> 3$  м, тобто оцінити ефективність роботи комбінованого дренажу.

**Висновки.** Запропонований підхід дозволяє комплексно оцінювати стан РГВ на території в результаті ідентифікації обернених задач, побудови карт рівнів ґрунтових вод та встановленні кількісних статистичних оцінок площ з різним РГВ.

Використання математичного моделювання дозволяє оцінити на сільських територіях ефективність функціонування горизонтального дренажу, який ефективно відводить ґрунтові води; вертикального дренажу, який знімає напір пліоценового горизонту і не допускає підпір ґрунтових вод. Застосування комбінованого дренажу (сумісного горизонтального і вертикального) дає найбільш ефективні варіанти реконструкції дренажних систем для умов напірного і інфільтраційного живлення.

1. Олейник А.Я. Фильтрационные расчеты вертикального дренажа. – К.: Наукова думка, 1978. – 224 с.
2. Згуровський М.З., Панкратова Н.Д. Основи системного аналізу. – К.: Видавнича група ВНУ, 2007. – 544 с.
3. Ковальчук В.П. Вдосконалення управління системами вертикального дренажу на основі ідентифікації моделей фільтрації та критеріальних оцінок // Вісник УДУВГП. – Вип. 3(47). – Ч.1.– Рівне, 2009. – С. 51-58.
4. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. – М.: Наука, 1977. – 664 с.
5. Костюкович П.Н. Гидрогеологические основы вертикального дренажа. – Минск: Ураджай, 1979. – 287 с.

Рецензент: д.т.н., професор Рокочинський А.М. (НУВГП)