
Розділ 2. Основи природокористування

УДК 532.546.626

© О.С. Волошкіна, д-р техн. наук, професор;
Ю.О. Березницька, асистент

Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ

ВПЛИВ ПРОЦЕСІВ ПІДТОПЛЕННЯ ТЕРИТОРІЙ НА ФОРМУВАННЯ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО ПОТОКУ В СХИЛАХ РЕГУЛЮЮЧИХ ВОДОСХОВИЩ

У роботі показано вплив процесів підтоплення на формування фільтраційного потоку в схилах регулюючих водосховищ. Здійснено аналітичне рішення задачі нестационарної фільтрації до регулюючого водосховища при різкому падінні рівня води та складній геологічній будові водоносної товщі.

Ключові слова: підтоплення територій, фільтраційний потік, схил регулюючого водосховища

Розвиток екзогенних геологічних процесів у паводконебезпечних регіонах безпосередньо залежить від величини стоку визначеної Р % забезпеченості та відповідного рівня підтоплення території, а також від призначення системи природоохоронних заходів. До останніх слід віднести також швидкість регулювання рівня води у водосховищах, які накопичують стік повені. Тут проблема стійкості відкосів набуває надзвичайної актуальності. Чітке врахування формування фільтраційного потоку в тілі схилу при управлінні рівнем води у водосховищі в значній мірі обумовлює його стійкість.

Найбільш небезпечним випадком сталості укосу є найбільш високе стояння депресійної кривої у випадку швидкого зниження рівня води у водосховищі, коли ґрунт ще не встиг «віддати» воду, якою він насичений. У цьому випадку фільтраційні лінії токів направлені до укосу, а розрахунок ведеться з урахуванням гідродинамічних сил, які є змінними у часі. Питанням визначення формування потоку фільтраційних вод у часі при швидкому зниженні води у регулюючій водоймі в різний час займалося багато відомих вчених [1-7].

Аналітичні рішення краєвої нестационарної задачі фільтрації наведені в наукових роботах для випадків однорідної та двохшарової водоносних товщ.

Для побудови кривої депресії до укосу пропонується залежність у випадку одношарової будови водоносної товщі [3]:

$$y(x,t) = h_0 - \frac{2H_0^2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} E_n \left(\alpha^{-\alpha \cdot C \cdot t h \alpha \cdot \frac{t \cdot k}{\mu \cdot h_0}} - 1 \right) \cdot \sin \frac{x}{H_0}, \quad (1)$$

у випадку двошарової водоносної товщі:

$$y(x,t) = h_0 - \frac{2H_0^2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \cdot e^{-\alpha \cdot C \cdot t h \frac{t \cdot k_1}{\mu \cdot h_0}} + B_n e^{-Q \frac{t \cdot k_1}{\mu \cdot h_0}} + C_n \right) \cdot \sin \frac{x}{H_0}. \quad (2)$$

У формулах (1) і (2):

H_0 - ордината горизонтальної площини, якою приблизно замінюється поверхня ґрунтових вод у початковий момент часу; параметр $C = 1 - \frac{\varepsilon}{K}$, де ε - інфільтраційне живлення на вільній поверхні, μ - коефіцієнт водовіддачі ґрунту, k і k_1 - коефіцієнти фільтрації однорідного ґрунту та верхнього шару двошарової схеми відповідно.

Параметри E_n , A_n , B_n , C_n та Q залежать від області фільтрації, глибини води в каналі, співвідношення коефіцієнтів фільтрації.

Як правило, подібні схеми розглядалися у наближеній постановці, яка ґрунтується на методі фільтраційних опорів. У більш чіткій постановці рішення подібних задач зводилося до розгляду вихідних рівнянь та граничних умов, які аналогічні умовам сталої фільтрації, але при додатковій нелінійній умові на вільній поверхні, яка описує характер її переміщення у часі [3, 5].

У паводконебезпечних регіонах має місце також розповсюдження тришарової будови водоносної товщі, коли горизонт, який складено з добре проникливих порід і який розташовано на слабо проникливих відкладеннях, перекривається зверху глинистими відкладеннями.

Мета даної роботи - дослідити формування рівня ґрунтових вод у випадку нестаціонарної фільтрації при швидкому зниженні рівня води в б'єфі перед укосом при різній геологічній будові водоносної товщі.

У даній роботі наводиться аналітичне рішення задачі нестаціонарної фільтрації в тілі схилу регулюючого водосховища при трьохшаровій будові водоносної товщі та наведена порівняльна характеристика з існуючими аналітичними рішеннями для більш спрощеної геологічної будови місцевості (при осередненні фільтраційних характеристик).

При цьому враховуємо, як і при рішенні стаціонарної задачі, водоупір, а також розподіл шарів ґрунту горизонтальними та те, що крива депресії ґрунтового потоку за весь час руху знаходиться тільки у верхньому шарі ґрунту. Схема задачі представлена на рис. 1.

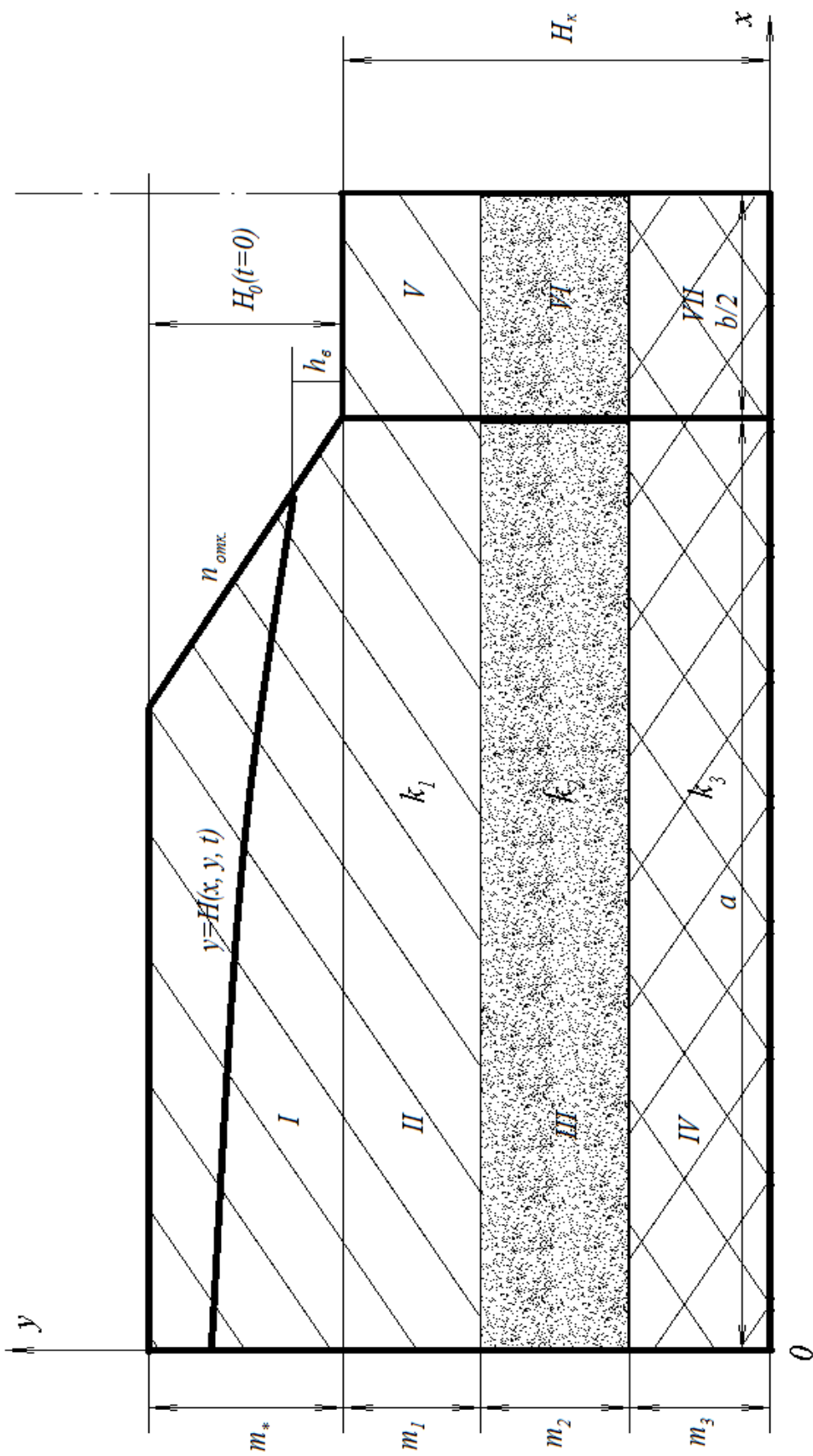


Рис. 1 — Схема формування нестационарного притоку до відкритої дрени в умовах тришарової будови водоносної товщі

Даний фільтраційний процес описується рівнянням еліптичного типу – рівнянням Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0, \quad (3)$$

де $\varphi(x, y, t)$ – потенціали швидкості фільтраційного потоку при наступних початкових та граничних умовах:

- на вільній поверхні (лінеаризована умова)

$$\left(\mu \frac{\partial \varphi}{\partial t} + (k - \varepsilon) \frac{\partial \varphi}{\partial y} - k_1 \varepsilon \right) \Big|_{y=H_0} = 0, \quad (4)$$

де k_1 - коефіцієнт фільтрації верхнього шару ґрунту, м/добу;

μ – коефіцієнт водовіддачі ґрунту;

ε – інфільтраційне живлення ґрунтових вод на вільну поверхню.

На границях області фільтрації початкові умови будуть наступними:

початкова умова $\varphi(x, y, 0) = -k_1 H_0$; $\varphi|_{x=a-h_2 n_{от}} = -k_1 y$;

$$\frac{\partial \varphi}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; \quad \frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{x=a+\frac{b}{2}} = 0;$$

$$\left(\frac{\partial H_i}{\partial y} - \frac{\partial H_{i+1}}{\partial y} \right) \Big|_{\substack{y=m_1+m_2+m_3 \\ y=m_2+m_3 \\ y=m_3, i=1,2,3,4}} = 0; \quad \left(\frac{\partial H_i}{\partial x} - \frac{\partial H_{i+1}}{\partial x} \right) \Big|_{x=a} = 0, \quad i=2, 3, 4, 5, 6, 7;$$

$$(H_i - H_{i+1}) \Big|_{x=a} = 0; \quad (H_i - H_{i+1}) \Big|_{\substack{y=m_1+m_2 \\ y=m_1+m_2+m_3}} = 0.$$

При даній постановці задачі вважаємо, що умова $a > 2(m_1 + m_2 + m_3)$ виконується, що дає нам підставу застосувати аналітичне рішення [7].

У крайових умовах (5):

H_0 – ордината горизонтальної площини, на яку приблизно змінюється поверхня ґрунтових вод в початковий момент часу, м;

a – відстань від границі області фільтрації до урізу дренажної водойми, м;

b – ширина відкритої дрени, м.

Оскільки аналітичне рішення передбачає лінеаризовану умову на вільній поверхні (не враховувалася нелінійна складова, що повністю відповідає умовам для задачі з малим похи-

лом депресійної кривої), поблизу виходу фільтраційного потоку на вертикальний укіс розрахунки, отримані за формулами, дають дещо завищені результати.

Цілком зрозуміло, що у випадку природного або штучного схилу похибка у розрахунку кривої депресії буде значно меншою та її можливо врахувати коефіцієнтом ξ . У роботі [9] значення коефіцієнта ξ рекомендується приймати наступні:

$$\xi=0,80-0,85 \text{ при } n=1 \dots 1,75;$$

$$\xi=0,90-0,95 \text{ при } n \leq 2,0.$$

У випадку тришарової будови ґрунту до загальної постановки задачі додається умова переходу потенціалу φ та його перших похідних через границю розділу шарів.

При аналітичному рішенні застосовуємо метод інтегральних перетворень.

Розіб'ємо область фільтрації на 7 фрагментів, як показано на рис. 1, та запишемо задачу для кожного фрагменту, попередньо здійснивши перехід в даній задачі до напору, як вишукваної функції координат і часу, відповідно до відомої залежності:

$$\varphi(x, y, t) = -kH(x, y, t). \quad (6)$$

З урахуванням наступних перетворень:

$$\begin{aligned} H^I &= \frac{H}{H_0}; \quad x^I = \frac{x}{H_0}; \quad y^I = \frac{y}{H_0}; \quad t^I = \frac{kt}{\mu H_0}; \quad W = \frac{\varepsilon}{k}; \\ c &= 1-W; \quad a^I = \frac{a}{H_0}; \quad m^I = \frac{m}{H_0}, \quad b^I = \frac{b}{H_0} \end{aligned} \quad (7)$$

отримуємо задачу (1) у безрозмірному вигляді:

$$\Delta H_i = 0, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,$$

де i – номер фрагменту I, II, III, IV, V, VI, VII відповідно та початкові і крайові умови:

$$\left(\frac{\partial H_i^I}{\partial t^I} + c \frac{\partial H_i^I}{\partial y^I} + W \right) \Big|_{y^I=1} = 0$$
$$\frac{\partial H_i^I}{\partial y^I} \Big|_{y^I=0} = 0; \quad \frac{\partial H_i^I}{\partial x^I} \Big|_{x^I=0} = 0; \quad \frac{\partial H_i^I}{\partial x^I} \Big|_{x^I=a+b/2} = 0; \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$$

$$\left(\frac{\partial H_i^l}{\partial y} - \frac{\partial H_{i+1}^l}{\partial y} \right) \Big|_{\substack{y^l=m_1 \\ y^l=m_1+m_2 \\ y^l=m_1+m_2+m_3}} = 0, \quad i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \quad (8)$$

$$(H_i^l - H_{i+1}^l) \Big|_{\substack{y^l=m_1 \\ y^l=m_1+m_2 \\ y^l=m_1+m_2+m_3}} = 0, \quad i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$$

$$H_1^l \Big|_{x^l=a^l-h_0 n^l} = y^l$$

$$H_1^l \Big|_{x^l=a^l+b/2} = H_k^l, \quad i=5, 6, 7$$

$$\left(\frac{\partial H_i^l}{\partial x} - \frac{\partial H_{i+1}^l}{\partial x} \right) \Big|_{x=a^l} = 0, \quad i=2, 3, 4, 5, 6, 7$$

$$(H_i^l - H_{i+1}^l) \Big|_{x=a^l} = 0, \quad i=2, 3, 4, 5, 6, 7$$

$$H^l(x, 1, 0) = 1.$$

Застосовуючи перетворення Лапласа у часі t^l [12]:

$$H^{*l}(x^l, y^l, S) = \int_0^{\infty} H^l(x^l, y^l, t^l)^m e^{-st^l} dt^l, \quad (9)$$

умова задачі (4)-(5) запишеться наступним чином:

$$\Delta H_i^{*l} = 0, \quad i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \quad (10)$$

$$\left(C \frac{\partial H_1^{*l}}{\partial y^l} + S H_1^{*l} \right) \Big|_{y^l=1} = 1 - \frac{W}{S} \quad (11)$$

$$\frac{\partial H_i^{*l}}{\partial y^l} \Big|_{y^l=0} = 0, \quad i=4, 7; \quad \frac{\partial H_i^{*l}}{\partial x^l} \Big|_{\substack{x^l=0 \\ x^l=a^l+b/2}} = 0, \quad i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \quad (12)$$

$$H_i^{*l}(x_1^l, 1, 0) = 1 \quad i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \quad (13)$$

$$H_i^{*l} \Big|_{x^l=a^*} = \frac{y^l}{S}; \quad H_i^{*l} \Big|_{x^l=a^*} = \frac{H_k}{S} \quad i=5, 6, 7; \quad (14)$$

$$\left(\frac{\partial H_i^{*l}}{\partial y^l} - \frac{\partial H_{i+1}^{*l}}{\partial y^l} \right) \Big|_{\substack{y^l=m_1 \\ y^l=m_1+m_2 \\ y^l=m_1+m_2+m_3}} = 0 \quad i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7; \quad \left(\frac{\partial H_i^{*l}}{\partial x^l} - \frac{\partial H_{i+1}^{*l}}{\partial x^l} \right) \Big|_{y=a^l} = 0 \quad i=2-7;$$

$$\left. (H_i^{*|} - H_{i+1}^{*|}) \right|_{\substack{y^|=m_1^| \\ y^|=m_1^|+m_2^| \\ x^|=a^|}} = 0 \quad i = 1-7; \quad \left. (H_i^{*|} - H_{i+1}^{*|}) \right|_{x^|=a^|} = 0 \quad i = 1-7$$

Розглянемо рішення фільтрації у фрагментах I – IV.

Між фрагментами II, III, IV і V, VI, VII введемо граничні умови першого роду $f^|(y)$, $\varphi^|(y)$ та $\psi^|(y)$ і робимо припущення, що вони не залежать від часу.

Після застосування до крайової задачі (10) - (12) синус-перетворення Фур'є по просторовій координаті $x^|$

$$\overline{H}_i^{*|}(y^|, S) = \int_0^{a^|} H_i^{*|}(x^|, y^|, S) \sin \alpha_n x^| dx^| \quad (15)$$

де α_n – корінь трансцендентного рівняння

$$\cos \alpha_n a^| = 0; \quad \alpha_n = \frac{(2n-1)\pi}{2a^|}, \quad n = 1, 2 \dots \quad (16)$$

Отримаємо в області зображення систему звичайних диференціальних рівнянь 2-го порядку з постійними коефіцієнтами

$$\frac{d^2 \overline{H}_1^{*|}}{d(y^|)^2} - \alpha_n^2 \overline{H}_1^{*|} + \frac{y^|}{S} \alpha_n = 0;$$

$$\frac{d^2 \overline{H}_2^{*|}}{d(y^|)^2} - \alpha_n^2 \overline{H}_2^{*|} + \frac{f^|(y)^|}{S} \alpha_n = 0;$$

$$\frac{d^2 \overline{H}_3^{*|}}{d(y^|)^2} - \alpha_n^2 \overline{H}_3^{*|} + \frac{\psi^|(y)^|}{S} \alpha_n = 0;$$

$$\frac{d^2 \overline{H}_4^{*|}}{d(y^|)^2} - \alpha_n^2 \overline{H}_4^{*|} + \frac{\varphi^|(y)^|}{S} \alpha_n = 0 \quad (17)$$

$$\left(C \frac{d\overline{H}_1^{*|}}{dy^|} - S\overline{H}_1^{*|} \right) \Big|_{y^|=1} = \frac{1}{\alpha_n} \left(1 - \frac{W}{S} \right) \quad (18)$$

$$\left. \frac{d\overline{H}_4^{*|}}{dy^|} \right|_{y^|=0} = 0 \quad (19)$$

$$\left(\frac{d\overline{H}_i^{*|}}{dy^|} - \frac{d\overline{H}_{i+1}^{*|}}{dy^|} \right) \Big|_{\substack{y^|=m_1^| \\ y^|=m_1^|+m_2^| \\ y^|=m_1^|+m_2^|+m_3^|}} = 0 \quad (20)$$

$$\left(\overline{H_i^*} - \overline{H_{i+1}^*} \right) \Big|_{y^l=m_1}^{y^l=m_1+m_2} \Big|_{y^l=m_1+m_2+m_3} = 0 \quad (21)$$

Рішення рівнянь (17) - (21) має вигляд:

$$\overline{H_1^*} = C_1 ch \alpha_n y^l + D_1 sh \alpha_n y^l + \frac{y^l}{\alpha_n S} \quad (22)$$

$$\overline{H_2^*} = C_2 ch \alpha_n y^l + D_2 sh \alpha_n y^l + \frac{1}{\alpha_n S} \left[ch \alpha_n y^l \times \int_0^{y_1} f(y') sh \alpha_n y' dy - sh \alpha_n y^l \int_0^{y_1} f(y') ch \alpha_n y' dy \right] \quad (23)$$

$$\overline{H_3^*} = C_3 ch \alpha_n y^l + D_3 sh \alpha_n y^l + \frac{1}{\alpha_n S} \left[ch \alpha_n y^l \times \int_0^{y_1} \varphi(y') sh \alpha_n y' dy - sh \alpha_n y^l \int_0^{y_1} \varphi(y') ch \alpha_n y' dy \right] \quad (24)$$

$$\overline{H_4^*} = C_4 ch \alpha_n y^l + D_4 sh \alpha_n y^l + \frac{1}{\alpha_n S} \left[ch \alpha_n y^l \times \int_0^{y_1} \psi(y') sh \alpha_n y' dy - sh \alpha_n y^l \int_0^{y_1} \psi(y') ch \alpha_n y' dy \right] \quad (25)$$

Граничні умови $f^l(y)$, $\varphi^l(y)$ та $\psi^l(y)$ першого роду знаходяться за допомогою графіків, поданих в роботі [13], за умови тришарової будови водоносної товщі.

Для того щоб знайти рівняння кривої депресії, достатньо визначити значення коефіцієнтів C_1 та D_1 шляхом рішення системи з восьми рівнянь з вісьмома невідомими.

Роблячи зворотне синус-перетворення Фур'є:

$$H_i^*(x^l, y^l, S) = \frac{2}{a^l} \sum_{n=1}^{\infty} \overline{H_i^*}(y^l, S) \sin \alpha_n x^l, \quad (26)$$

знаходимо розподіл напору в області фільтрації I в зображенні Лапласа:

$$H_1^*(x^l, y^l, S) = \frac{2}{a^l} \sum (C_1 ch \alpha_n y^l + D_1 sh \alpha_n y^l + \frac{y^l}{\alpha_n S}) \bullet \sin \alpha_n x^l \quad (27)$$

Зворотне перетворення Лапласа у часі для рівняння (27) дасть рішення вільної поверхні у часі:

$$y(x, t) = H_0 - \frac{2H_0^2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} E_n \left(\alpha^{-\alpha \bullet (1 - \frac{\varepsilon}{k_1} \bullet th \alpha_n \bullet \frac{t \bullet k_1}{\mu \bullet H_0} - 1)} \bullet \overline{R} \bullet \sin \alpha_n \frac{x}{H_0} \right) \quad (28)$$

Комплексний параметр \bar{R} залежить від співвідношення коефіцієнтів фільтрації та потужності шарів ґрунту, а також геометричних параметрів схем фільтрації та знаходиться за допомогою номограм, побудованих для різних співвідношень даних параметрів.

Отримані залежності формування фільтраційного потоку в схилах регулюючих водосховищ дозволять більш обґрунтовано прогнозувати їх сталість в залежності від рівня наповнення водосховища. Доцільними є подальші дослідження щодо порівняння даних служби Держгідромету в роки проходження найбільш катастрофічних повеней в Закарпатському регіоні (рівень затоплення території) та даних розвитку екзогенних геологічних процесів після проходження повеней певної забезпеченості для апробації отриманих формул та призначення на цій основі природоохоронних заходів.

Список використаної літератури

1. Аравин В.И., Нулиров С.Н. Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений. – М.: Госстройиздат, 1955. – 291 с.
2. Канарский В.Н. Устойчивость и прочность откосов земляных сооружений. – М.: Энергоиздат, 1982. – 113 с.
3. Олейник А.Я., Волошкина Е.С. Расчет нестационарной фильтрации к откосу несовершенного канала с учетом инфильтрации на свободной поверхности. – Доклады АН УССР, 1985, № 5, с. 43-45.
4. Хубларян М.Г., Юшманова О.О. Приближенное аналитическое решение задачи нестационарной инфильтрации. – Водные ресурсы, 1982, № 1, с. 107-112.
5. Шестаков В.М. Динамика подземных вод. – М.: Изд-во Московского университета, 1979. – 368 с.
6. В.М. Шестаков. Некоторые вопросы моделирования неустановившейся фильтрации. Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений. Москва, 1956 г., с. 129-140.
7. Олійник О.Я. Геогідродинаміка дренажа. – К.: Наукова думка, 1981. – 283 с.
8. А.Н. Трофимчук, Ю.И. Калюх, А.С. Глебчук. Математическое моделирование устойчивости склона при подъеме уровня грунтовых вод // Екологія і ресурси, 2008, К.: ПНБ, № 18, - 51-58 с.
9. Волошкина Е.С. Определение фильтрационных параметров притока к открытым дренажным каналам, работающим в условиях переменного уровня воды в русле // Мелиорация и водное хозяйство. – К., - 1987. – Вып. 66. – с. 67-70
10. Яковлев Є.О., Волошкіна О.С., Копка П.М. Вплив сучасних факторів регіонального підтоплення земель України на формування національних загроз // Екологія і ресурси. 2005, К.: ПНБ, № 12, - 15-36 с.
11. Г. Корн, Т. Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 832.
12. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

13. Волошкіна О.С., Березницька Ю.О. Застосування методу фільтраційних опорів при розрахунках рівня ґрунтових вод підтоплених територій Екологічна безпека та природокористування: зб. наук. праць / М-во освіти і науки України, Київ, нац. ун-т буд-ва і архіт., НАН України, Ін-т телекомунікацій і глобал. інформ. простору. – К., 2010. – Вип. 5. – С. 75-83.

Стаття надійшла до редакції 04.03.13 українською мовою

© Е.С. Волошкина, Ю.А. Березницкая
ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОДТОПЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ
ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА В СКЛОНАХ
РЕГУЛИРУЮЩИХ ВОДОХРАНИЛИЩ

В работе показано влияние процессов подтопления на формирование фильтрационного потока в откосах регулирующих водохранилищ. Приведено аналитическое решение задачи нестационарной фильтрации к откосу регулирующего водохранилища при резком падении уровня воды и сложном геологическом строении.

© O.S. Voloshkina, Y.O. Bereznytska
AN INFLUENCE OF PROCESSES OF UNDERFLOODING ON FORMING
OF LAUTER STREAM IN THE HAY-CROPS OF REGULATIVE STORAGE POOLS

The paper introduces an influence of processes of underflooding on forming of lauter stream in the hay-crops of regulative storage pools. It is shown the analytical decision of non-stationary filtration task in the body of regulative storage pool in condition of sharp falling of water level and difficult geological structure.