

УДК 519.61/.64:627.05

Медвідь Н. В., аспірант (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВОДОВОДУ ТА ЗОНИ ВИМИВУ НА ПРОЦЕСИ ФІЛЬТРАЦІЙНОЇ КОНСОЛІДАЦІЇ ҐРУНТОВОЇ ГРЕБЛІ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Побудовано математичну модель фільтраційної консолідації тіла ґрунтової греблі з водоводом та зоною вимиву в тривимірному випадку. Враховано вплив техногенних факторів – температури та концентрації хімічних речовин. Створено програмне забезпечення для відшукування чисельного розв’язку відповідної нелінійної крайової задачі методом скінченних елементів. Проведено аналіз ряду чисельних експериментів.

Ключові слова: фільтраційна консолідація, тривимірна математична модель, водовід та зона вимиву, метод скінченних елементів, FreeFem++.

Вступ. Розвиток гідротехнічного будівництва зумовив зростання інтересу до питань консолідації ґрунтів. Такі поширені завдання, як дослідження стійкості будівель та гідротехнічних споруд або дослідження ґрунтів в якості основ гідротехнічних споруд чи в якості матеріалу для їх спорудження обов’язково мають своєю складовою задачу вивчення і прогнозування процесів консолідації ґрунтів.

Із досвіду вітчизняного та зарубіжного греблебудування відомо чимало випадків аварій і пошкоджень ґрунтових гребель, пов’язаних з наявністю водоводів в тілі греблі. При цьому близько 40% із них (аварій) ставалося по причині зосередженої фільтрації [1]. Також автор відмічає, що виникнення контактної зосередженої фільтрації вздовж водоводу є основною причиною аварій ґрунтових гребель з водоводами. А це в свою чергу впливає на розмив ґрунту тіла греблі.

Оскільки більше 80% побудованих за останні десятиліття в світі водопідпірних споруд припадає на долю ґрунтових гребель, а в значній їх кількості для пропуску води широко використовуються водопропускні споруди трубчастої конструкції – водоводи, то питання прогнозування роботи ґрунтової греблі з водоводом є дуже важливим. Проведення натурних експериментів при проектуванні вказаних гідротехнічних споруд може вимагати затрат значних матеріальних ресурсів. Тому, прогноз поведінки гідротехнічних споруд (ГТС) інколи доціль-

ніше робити засобами математичного моделювання.

Аналіз останніх досліджень та їх методика.

Наявність водоводу в тілі греблі має суттєвий вплив на характер фільтрації в зоні навколо водоводу навіть при справній його роботі, а особливо при його пошкодженнях. Зокрема, можуть розвинутиися небезпечні фільтраційні деформації, викликані контактною зосередженою фільтрацією вздовж водоводу з розмивом ґрунтів тіла; підйом депресійної поверхні і суфозія тіла греблі, які супроводжуються зниженням стійкості; суфозійний виніс ґрунту тіла всередину водоводу при його пошкодженнях [1]. Для уникнення аварійних ситуацій і передбачити наслідки, ризикам аварій на ґрунтових греблях приділяють серйозну увагу [2-5].

Математичне моделювання процесів фільтраційної консолідації в ґрунтах з урахуванням впливу теплосолеперенесення досліджено в роботах [6; 7]. Але в цих роботах не враховано наявності в тілі греблі водоводу та можливої зони вимиву. В роботі [8] досліджені проблеми фільтраційної консолідації в ґрунтовій греблі з водоводом та зоною вимиву, але задача розглянута двовимірною. Також двовимірною задачею контактного розмиву ґрунту на основі ґрунтової греблі розглянута і в роботах [9; 10]. Ціллю ж даної статті є розгляд тривимірної задачі для дослідження впливу наявності водоводу та зони вимиву на фільтраційні процеси в тілі греблі.

Постановка задачі.

В якості модельної розглянемо тривимірну задачу фільтраційної консолідації в тілі ґрунтової греблі, яка зображена на рис. 1. З математичної точки зору, гребля – це тривимірною областю Ω_1 з межами $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5$, вільною межею Γ_0 , водоводом та зоною вимиву Ω_2 .

Математична модель тривимірної задачі фільтраційної консолідації через тіло ґрунтової греблі з водоводом та зоною вимиву з урахуванням впливу теплосолеперенесення та наявності суспензії містить наступні рівняння [6; 8; 11]:

- нестационарне рівняння фільтрації

$$\nabla(K(c, T)\nabla h) - \nabla(K_c \nabla c) - \nabla(K_T \nabla T) = \beta \frac{\partial h}{\partial t}, X \in \Omega_1 \cup \Omega_2, \quad (1)$$

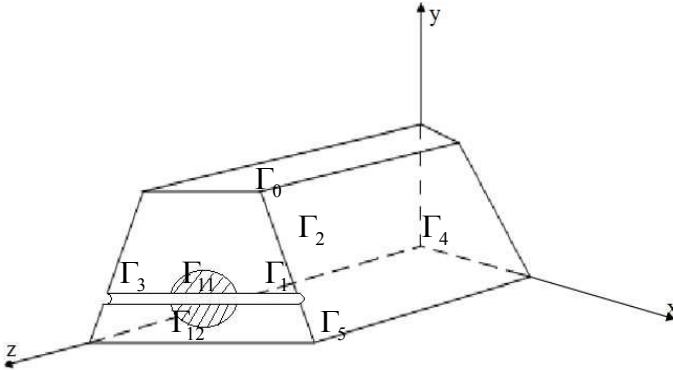


Рис. 1. Тіло ґрунтової греблі

- рівняння солеперенесення

$$\nabla(D_T^{(c)} \nabla T) + \nabla(D_c \nabla c) - \mathbf{u} \cdot \nabla c = \sigma \frac{\partial c}{\partial t}, X \in \Omega_1 \cup \Omega_2, \quad (2)$$

- рівняння теплоперенесення

$$\nabla(\lambda \nabla T) - \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = c_T \frac{\partial T}{\partial t}, X \in \Omega_1 \cup \Omega_2, \quad (3)$$

- рівняння зміни концентрації суспензії

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{D}_s \nabla s) - \mathbf{u} \cdot \nabla s, X \in \Omega_2, \quad (4)$$

- закон фільтрації, в якому враховано залежність параметрів фільтрації від концентрації солей, температури та функції самих напорів [6, 7], а також знехтувано швидкістю руху твердих частинок ґрунту

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}(c, T) \nabla h + \mathbf{K}_c \nabla c + \mathbf{K}_T \nabla T.$$

Значення коефіцієнтів вищенаведених рівнянь залежать від області Ω_1 або Ω_2 , в яку попадає точка X .

Вказані рівняння доповнюються початковими і граничними умовами:

$$c(X, 0) = C_0(X), T(X, 0) = T_0(X), h(X, 0) = h_0(X), s(X, 0) = s_0(X),$$

$$h(X) \Big|_{\Gamma_1 \cup \Gamma_0} = y, X \in \Gamma_1 \cup \Gamma_0, h(X) \Big|_{\Gamma_2} = H_1(X), X \in \Gamma_2,$$

$$(\nabla h, \mathbf{n}) \Big|_{\Gamma_3 \cup \Gamma_4 \cup \Gamma_5} = 0, X \in \Gamma_3 \cup \Gamma_4 \cup \Gamma_5, c(X, t) \Big|_{\Gamma_1} = C_1, X \in \Gamma_1,$$

$$\begin{aligned} c(X, t) \Big|_{\Gamma_2} &= C_m(X, t), X \in \Gamma_2, (D_c \nabla c + D_T \nabla T, n) \Big|_{\Gamma_0 \cup \Gamma_2} = 0, X \in \Gamma_0 \cup \Gamma_2, \\ (\nabla c, n) \Big|_{\Gamma_3 \cup \Gamma_4 \cup \Gamma_5} &= 0, X \in \Gamma_3 \cup \Gamma_4 \cup \Gamma_5, T(X, t) \Big|_{\Gamma_0 \cup \Gamma_1 \cup \Gamma_2} = T_{amm}(X, t), \\ X \in \Gamma_0 \cup \Gamma_1 \cup \Gamma_2, (\nabla T, n) \Big|_{\Gamma_3 \cup \Gamma_4 \cup \Gamma_5} &= 0, X \in \Gamma_3 \cup \Gamma_4 \cup \Gamma_5, \\ s(X, t) \Big|_{\Gamma_{11}} &= s_1(X, t), X \in \Gamma_{11}, s(X, t) \Big|_{\Gamma_{12}} = s_2(X, t), X \in \Gamma_{12}. \end{aligned}$$

Вільна межа Γ_0 (крива депресії) описується співвідношенням [12]

$$\varphi(X, t) = (y - h(X, t)) \Big|_{\Gamma_0} = 0,$$

і на ній задається кінематична гранична умова [12]

$$(u, n) \Big|_{\Gamma_0} = \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial t}.$$

Тут σ – пористість ґрунту; h – напір в поровій рідині; c – концентрація однокомпонентного хімічного розчину; T – температура; u – вектор швидкості фільтрації; K – тензор коефіцієнтів фільтрації; K_c – тензор коефіцієнтів хімічного осмосу; K_T – тензор коефіцієнтів термічного осмосу; D_c, D_T – тензори коефіцієнтів конвективної дифузії та термодифузії; λ – тензор коефіцієнтів ефективної теплопровідності вологого ґрунту; ρ – густина порового розчину; c_p – питома теплоємність порового розчину; c_T – об'ємна теплоємність ґрунту; C_m – концентрація граничного насичення хімічних речовин в рідкій фазі.

Для відшукування наближеного розв'язку поставленої крайової задачі використано метод скінченних елементів (МСЕ).

Слабке формулювання крайової задачі. Домножимо рівняння (1) та початкову умову для напорів на пробну функцію $v(X) \in H_0 = \{v(X) : v(X) \in W_2^1(\Omega)\}$, $v(X) \Big|_{\Gamma_0 \cup \Gamma_1 \cup \Gamma_2} = 0$,

інтегруємо їх по області $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$, виконуємо спрощуючі перетворення і отримаємо:

$$\begin{aligned}
 & - \iiint_{\Omega} (K(c, T) \nabla h \nabla v) d\Omega + \iiint_{\Omega} (K_c \nabla c \nabla v) d\Omega + \iiint_{\Omega} (K_T \nabla T \nabla v) d\Omega = \\
 & = \iiint_{\Omega} \beta \frac{\partial h}{\partial t} \cdot v(X) d\Omega, \\
 & \iiint_{\Omega} h(X, 0) \cdot v(X) d\Omega = \iiint_{\Omega} h_0(X) \cdot v(X) d\Omega.
 \end{aligned}$$

Наближений розв'язок для напорів знаходимо у вигляді:

$$h(X, t) = \sum_{j=1}^n a_j(t) \cdot N_j^{(h)}(X),$$

а $v(X)$ покладається рівною кожній $N_i^{(h)}(X)$, $i = \overline{1, n}$. Отримаємо задачу Коші

$$\mathbf{M} \cdot \frac{d\mathbf{A}}{dt} + \mathbf{L} \cdot \mathbf{A}(t) = \mathbf{F}, \quad (5)$$

$$\mathbf{M} \cdot \mathbf{A}^{(0)} = \mathbf{F}^{(0)}, t = 0, \quad (6)$$

де

$$\mathbf{A} = (a_1(t), a_2(t), \dots, a_n(t))^T, \mathbf{M} = (m_{ij})_{i,j=1}^n, \mathbf{L} = (l_{ij})_{i,j=1}^n, \mathbf{F} = (f_i)_{i=1}^n,$$

$$\mathbf{A}^{(0)} = (a_1(0), \dots, a_n(0))^T, \mathbf{F}^{(0)} = (f_i^0)_{i=1}^n; m_{ij} = \beta \iiint_{\Omega} N_i^h N_j^h d\Omega;$$

$$l_{ij} = \iiint_{\Omega} K \left(\frac{\partial N_i^{(h)}}{\partial x} \frac{\partial N_j^{(h)}}{\partial x} + \frac{\partial N_i^{(h)}}{\partial y} \frac{\partial N_j^{(h)}}{\partial y} + \frac{\partial N_i^{(h)}}{\partial z} \frac{\partial N_j^{(h)}}{\partial z} \right) d\Omega;$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{L}^{(c)} \cdot \mathbf{C}(t) + \mathbf{L}^{(T)} \cdot \mathbf{T}(t), \mathbf{C}(t) = (c_1(t), c_2(t), \dots, c_n(t))^T,$$

$$\mathbf{T}(t) = (T_1(t), T_2(t), \dots, T_n(t))^T, \mathbf{L}^{(c)} = (l_{ij}^{(c)})_{i,j=1}^n, \mathbf{L}^{(T)} = (l_{ij}^{(T)})_{i,j=1}^n,$$

$$l_{ij}^{(c)} = \iiint_{\Omega} K_c \left(\frac{\partial N_i^{(h)}}{\partial x} \frac{\partial N_j^{(c)}}{\partial x} + \frac{\partial N_i^{(h)}}{\partial y} \frac{\partial N_j^{(c)}}{\partial y} + \frac{\partial N_i^{(h)}}{\partial z} \frac{\partial N_j^{(c)}}{\partial z} \right) d\Omega,$$

$$l_{ij}^{(T)} = \iiint_{\Omega} K_T \left(\frac{\partial N_i^{(h)}}{\partial x} \frac{\partial N_j^{(T)}}{\partial x} + \frac{\partial N_i^{(h)}}{\partial y} \frac{\partial N_j^{(T)}}{\partial y} + \frac{\partial N_i^{(h)}}{\partial z} \frac{\partial N_j^{(T)}}{\partial z} \right) d\Omega,$$

$$f_i^0 = \iiint_{\Omega} h_0 \cdot N_i^h d\Omega.$$

Розіб'ємо часовий проміжок на m рівних частин з кроком $\tau = \frac{T}{m}$.

Наближений розв'язок задачі Коші отримаємо за допомогою лінеаризованої неявної різницевої схеми

$$\mathbf{M} \cdot \frac{\mathbf{A}^{(j+1)} - \mathbf{A}^{(j)}}{\tau} + \mathbf{L} \cdot \mathbf{A}^{(j+1)} = \mathbf{F}^{(j+1)},$$

$$\mathbf{M}^{(0)} \cdot \mathbf{A}^{(0)} = \mathbf{F}^{(0)}, j = 0, 1, \dots, m-1.$$

Домножимо рівняння (2) та початкову умову для концентрації солей на пробну функцію

$$v1(\mathbf{X}) \in H_0 = \{v1(\mathbf{X}) : v1(\mathbf{X}) \in W_2^1(\Omega)\}, v1(\mathbf{X})|_{\Gamma_1 \cup \Gamma_2} = 0$$

і провівши аналогічні перетворення, отримаємо:

$$\begin{aligned} \iiint_{\Omega} (D_T^{(c)} \nabla T \nabla v1) d\Omega + \iiint_{\Omega} (D_c \nabla c \nabla v1) d\Omega + \iiint_{\Omega} (u \nabla c \cdot v1) d\Omega = \\ = \iiint_{\Omega} n \left(\frac{c^i - c^{i-1}}{dt} \cdot v1 \right) d\Omega, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\iiint_{\Omega} c(\mathbf{X}, 0) \cdot v1(\mathbf{X}) d\Omega = \iiint_{\Omega} C_0(\mathbf{X}) \cdot v1(\mathbf{X}) d\Omega. \quad (8)$$

Домножимо рівняння (3) та початкову умову для температури на пробну функцію

$$v2(\mathbf{X}) \in H_0 = \{v2(\mathbf{X}) : v2(\mathbf{X}) \in W_2^1(\Omega)\}, v2(\mathbf{X})|_{\Gamma_0 \cup \Gamma_1 \cup \Gamma_2} = 0$$

і, провівши аналогічні перетворення, отримаємо:

$$\begin{aligned} \iiint_{\Omega} (\lambda \nabla T \nabla v2) d\Omega + \iiint_{\Omega} (\rho c_p u \nabla T \cdot v2) d\Omega = \\ = \iiint_{\Omega} c_T \left(\frac{T^i - T^{i-1}}{dt} \cdot v2 \right) d\Omega, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\iiint_{\Omega} T(\mathbf{X}, 0) \cdot v2(\mathbf{X}) d\Omega = \iiint_{\Omega} T_0(\mathbf{X}) \cdot v2(\mathbf{X}) d\Omega. \quad (10)$$

Домножимо рівняння (4) та початкову умову для концентрації суспензії на пробну функцію

$$v3(\mathbf{X}) \in H_0 = \{v3(\mathbf{X}) : v3(\mathbf{X}) \in W_2^1(\Omega)\}, v3(\mathbf{X})|_{\Gamma_{11} \cup \Gamma_{12}} = 0$$

і, провівши аналогічні перетворення, отримаємо:

$$\iiint_{\Omega} (D_s \nabla s \nabla v_3) d\Omega + \iiint_{\Omega} (u \nabla s \cdot v_3) d\Omega = \iiint_{\Omega} \left(\frac{s^i - s^{i-1}}{dt} \cdot v_3 \right) d\Omega, \quad (11)$$

$$\iiint_{\Omega} s(X, 0) \cdot v_3(X) d\Omega = \iiint_{\Omega} s_0(X) \cdot v_3(X) d\Omega. \quad (12)$$

Відмітимо, що при програмній реалізації чисельного розв'язання вищенаведеної крайової задачі в середовищі FreeFem++ безпосередньо використовуються слабкі формулювання виду (7)-(12), а не задача Коші (5), (6). Запис у вигляді задачі (5), (6), по-аналогії, можна навести і для інших невідомих функцій і сформулювати це у вигляді задачі Коші для загальної системи нелінійних диференціальних рівнянь (див. наприклад [7; 8; 12]). Такі загальні записи, як правило, використовують для теоретичного дослідження існування та єдності наближеного узагальненого розв'язку, його точності та збіжності. Такі дослідження автором статті плануються в майбутніх роботах.

Результати чисельних експериментів. Вхідні дані:

$$\sigma = 0.4, \rho = 1100 \text{ кг} / \text{м}^3, C_m = 160 \text{ г} / \text{л}, D_c = 0.001 \text{ м}^2 / \text{доба},$$

$$D_T = 0.0001 \text{ кг} / \text{доба} \cdot \text{м} \cdot ^\circ \text{C}, K_C = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^5 / \text{кг} \cdot \text{доба},$$

$$K_T = 6 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 / ^\circ \text{C} \cdot \text{доба}, c_T = 2137 \text{ кДж} / \text{м}^3 \cdot ^\circ \text{C},$$

$$c_\rho = 4,2 \text{ кДж} / \text{кг} \cdot ^\circ \text{C}, \lambda = 108 \text{ кДж} / \text{м} \cdot ^\circ \text{C} \cdot \text{доба}$$

Задача розв'язана в середовищі FreeFem++, яке являє собою програмне забезпечення для розв'язування крайових задач для диференціальних рівнянь МСЕ [13]. Проведено ряд чисельних експериментів. Отримані значення температури, концентрації солей, суспензії та напорів на момент часу 360 діб.

На рисунку 2 зображено розподіл надлишкових напорів в тілі ґрунтової греблі з урахуванням впливу теплосолеперенесення на момент часу 360 діб. Напори збільшуються з 0.0116644 м на низовій грані до 30 м на напірній. Максимальна зміна вільної межі становить 1,42276 м. А на рисунку 3 зображено розподіл надлишкових напорів в тілі греблі з водоводом та зоною вимиву з урахуванням впливу теплосолеперенесення також на момент часу 360 діб. Максимальна зміна вільної межі становить 1,50815 м. Надлишкові напори плавно збільшуються з 0.0078392 м на низовій грані до 30 м на напірній. В зоні вимиву напори змінюються з 6 м до 22.7751 м. Це призводить до різкого зростання градієнтів напорів в околі даної зони вимиву та до збільшення швидкості руху порової рідини. А це в свою чергу, може викли-

кати подальший вимив ґрунту та збільшення зони вимиву.

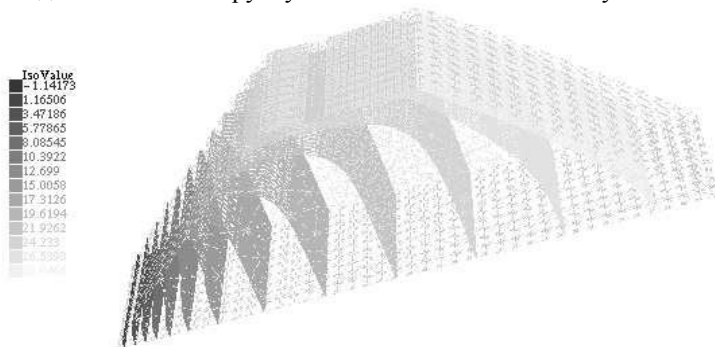


Рис. 2. Розподіл надлишкових напорів в ґрунтовій греблі через 360 діб

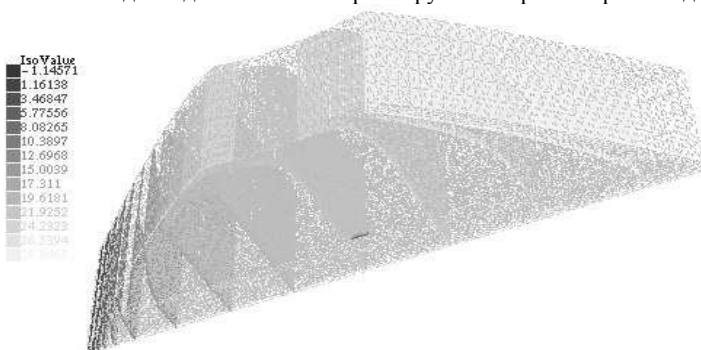


Рис. 3. Розподіл надлишкових напорів в греблі з водоводом та зоною вимиву через 360 діб

Отже, різниця зміни вільної поверхні (кривої депресії) становить близько 0,09 м через 360 діб. Через 720 діб ця різниця становить уже близько 0,82 м. Тобто в ґрунтовій греблі, що має прорив у водоводі, вільна межа з часом просідає більше і це потрібно враховувати.

Розподіл концентрації солей варіюється з 7.36359 г/л на низовій грані та гребені до 160 г/л на напірній грані. В зоні вимиву значення концентрації змінюються з 8.34753 г/л до 8.90031 г/л.

Температура змінюється від підшови греблі з 4.10752° C до гребеня з температурою 30° C. В зоні вимиву – з 4.1524° C до 4.44315° C.

Розподіл концентрації суспензії в зоні вимиву змінюється від 0, в зоні пошкодження водоводу, до 0,6.

Висновки. В статті виконано розрахунок фільтраційної консолідації, встановлено положення кривої депресії в тілі греблі, а також враховано вплив водоводу та зони вимиву, теплосолеперенесення та суспензії. В статті для розрахунку отриманих результатів використано МСЕ і це дало суттєву перевагу у тривимірному випадку, оскільки дозволило врахувати геометрію області. Так, наявність водоводу та зони вимиву має суттєвий вплив на процеси фільтраційної консолідації в тілі греблі, оскільки максимальна різниця зміни вільної поверхні через 720 діб становить 0,82 м. Також через отвір у пошкодженому водоводі може початися суфозійний виніс ґрунту з подальшими прогресуючими деформаціями і руйнуванням споруди. Отримані результати дозволяють побачити вплив утвореної зони вимиву на характер руйнування ґрунтової греблі.

Дослідження динаміки зміни зони вимиву в часі стане напрямком подальших робіт.

1. Анахаев К. Н. Об авариях и повреждениях земляных плотин с водоводами: причины и способы совершенствования противофильтрационной защиты / К. Н. Анахаев, К. А. Гегиев, Б. Х. Амшоков // Гидротехническое строительство. – 2004. – № 3. – С. 30–36.
2. Иващенко И. Н. Вероятностная оценка риска аварий плотин по результатам их мониторинга и обследований / И. Н. Иващенко, Д. Б. Радкевич, К. И. Иващенко // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 7. – С. 22–28.
3. Глаговский В. Б. Новые тенденции в строительстве грунтовых плотин / В. Б. Глаговский, В. Г. Радченко // Гидротехническое строительство. – 2013. – № 1. – С. 2–8.
4. Иващенко И. Н. Оценка и регулирование риска аварий плотин / И. Н. Иващенко, К. И. Иващенко // Гидротехническое строительство. – 2013. – № 3. – С. 14–20.
5. Арефьев Н.В. Автоматизированное управление чрезвычайными ситуациями в энерговодохозяйственной системе с целью снижения экологических рисков / Н. В. Арефьев, Т. С. Жакова // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – № 11 (151). – С. 139–145.
6. Власюк А. П. Чисельне розв'язування задач консолідації та фільтраційного руйнування ґрунтів в умовах тепломасопереносу методом радіальних базисних функцій / А. П. Власюк, П. М. Мартинюк. – Рівне : НУВГП, 2010. – 277 с.
7. Власюк А. П. Математичне моделювання консолідації ґрунтів при фільтрації сольових розчинів в неізотермічних умовах / А. П. Власюк, П. М. Мартинюк. – Рівне : НУВГП, 2008. – 416 с.
8. Медвідь Н. В. Математичне моделювання впливу на надлишкові напори наявності зони вимиву в ґрунтовій греблі з водоводом / Н. В. Медвідь, П. М. Мартинюк // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки. – 2014. – Випуск 10. – С. 101–112.
9. Sellmeijer J. B. On the mechanism of piping under impervious structures (Thesis) / J. B. Sellmeijer // LGM-Mededelinger. – 1988. – № 96. – 112 p.
10. Sellmeijer J. B. Numerical computation of seepage erosion below dams (piping) / J. B. Sellmeijer // Proc. 3rd Int. Conf. Scour and Erosion, Amsterdam. – 2006. – 6 p.
11. Медвідь Н. В. Математичне моделювання фільтрації через ґрунтову греблю з водоводом та

зоною вимиву в умовах впливу техногенних факторів / Н. В. Медвідь, П. М. Мартинюк // Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики: Збірник наукових праць. – Львів, 2015. – С. 223–224. **12.** Сергиенко И. В. Математическое моделирование и исследование процессов в неоднородных средах / И. В. Сергиенко, В. В. Скопецкий, В. С. Дейнека. – Киев : Наук. думка, 1991. – 432 с. **13.** FreeFem++. Third Edition / F. Hecht, S. Auliac, O. Pironneau, J. Morice, A. Le Hyaric, K. Ohtsuka. – Laboratoire Jacques-Louis Lions, Université Pierre et Marie Curie Paris. – 378 p. – Режим доступу: <http://www.freefem.org/ff++/ftp/freefem++doc.pdf>.

Рецензент: д.т.н., професор Хлапук М. М. (НУБГП)

Medvid N. V., Post-graduate Student (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

RESEARCH OF INFLUENCE OF CONDUIT AND WASHED ZONE ON THE PROCESSES OF FILTRATION CONSOLIDATION IN SOIL DAM BY FINITE ELEMENT METHOD

The mathematical model of filtration consolidation in soil dam with conduit and washed zone in 3D case was built. The impact of technogenic factors - temperature and concentrations of chemicals - was taken into account. Software for finding the numerical solution of corresponding nonlinear boundary problem by finite element method has been created. A number of numerical experiments has been analyzed.

Keywords: filtration consolidation, three-dimensional mathematical model, conduit and washed zone, finite element method, FreeFem ++.

Медвідь Н. В., аспірант (Національний університет водного господарства и природопользования, г. Ровно)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОДОВОДА И ЗОНЫ РАЗМЫВА НА ПРОЦЕССЫ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ КОНСОЛИДАЦИИ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Построена математическая модель фильтрационной консолидации тела грунтовой плотины с водоводом и зоной размыва в трех-

мерном случае. Учтено влияние техногенных факторов - температуры и концентрации химических веществ. Создано программное обеспечение для поиска численного решения соответствующей нелинейной краевой задачи методом конечных элементов. Проведен анализ ряда численных экспериментов.

Ключевые слова: фильтрационная консолидация, трехмерная математическая модель, водовод и зона размыва, метод конечных элементов, FreeFem ++.
