

Жук В.М., канд. техн. наук, Бошота В.В.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НАПОВНЕННЯ ЕКСФІЛЬТРАЦІЙНОЇ ТРАНШЕЇ В БЕЗРОЗМІРНИХ ЗМІННИХ ПРИ ПОСТІЙНОМУ ПРИТОЦІ ДОЩОВОГО СТОКУ

Анотація. У статті представлена нова математична модель наповнення одношарової ексфільтраційної траншеї, призначеної для регулювання дощового стоку з урбанізованих територій. Отримано систему диференціальних рівнянь в безрозмірних змінних, що описують матеріальний баланс води в траншеї та ґрунті під дном траншеї. Розроблено комп'ютерну програму для чисельного розрахунку процесу наповнення траншеї за методом кінцевих різниць. Отримано графічні залежності висоти наповнення ексфільтраційної траншеї, влаштованої в піщаних ґрунтах середньої крупності, від безрозмірної тривалості дощу та співвідношення довжини та ширини траншеї при постійному притоці дощових стічних вод до траншеї.

Ключові слова: регулювання дощового стоку, ексфільтраційна траншея, висота наповнення, безрозмірна тривалість дощу.

Аннотация. В статье представлена новая математическая модель наполнения однослойной эксфильтрационной траншеи, предназначенной для регулирования дождевого стока с урбанизированных территорий. Получена система дифференциальных уравнений в безразмерных переменных, описывающих материальный баланс воды в траншее и почве под дном траншеи. Разработана компьютерная программа для численного расчета процесса наполнения траншеи по методу конечных разностей. Получены графические зависимости высоты наполнения эксфильтрационной траншеи, устроенной в песчаных грунтах средней крупности, от безразмерной продолжительности дождя и соотношения длины и ширины траншеи при постоянном притоке дождевых сточных вод в траншею.

Ключевые слова: регулирование дождевого стока, эксфильтрационная траншея, высота наполнения, безразмерная продолжительность дождя.

Annotation. The paper presents a new mathematical model of the filling of single-layer exfiltration trench designed to control stormwater runoff from urban areas. A system of differential equations in dimensionless variables, describing the water balance in the trench and in the soil under the trench, is obtained. A computer program for numerical calculation of the process of filling the trench is developed, using the method of finite differences. Dependences of the trenches' filling height from the dimensionless duration of the rainfall and the length – width ratio of the trench are obtained for the exfiltration trenches, built in the middle-size sandy soils and at the constant stormwater inflow discharge.

Key words: stormwater management, exfiltration trench, filling height, dimensionless duration of the rainfall.

Постановка проблеми

Перспективним шляхом підвищення ефективності та надійності роботи систем дощового водовідведення є регулювання дощового стоку за допомогою ексфільтраційних траншей [1–7]. Ексфільтраційні траншеї дозволяють суттєво зменшити об'єм та максимальну витрату поверхневого стоку, який транспортується водовідвідною мережею. Відтак, це обумовлює зменшення діаметрів водовідвідних трубопроводів, що суттєво знижує вартість їх будівництва. Ще однією важливою перевагою ексфільтраційних траншей є те, що вони сприяють збереженню гідрологічного балансу території після її забудови.

Робота ексфільтраційної траншеї залежить від багатьох факторів, а саме: від кліматичних умов місцевості, від прийнятого періоду одноразового перевищення розрахункової інтенсивності дощу P , від значення коефіцієнта стоку ψ_{mid} , від коефіцієнта фільтрації ґрунту k_f , від глибини залягання ґрунтових вод $H_{гв}$, від площі та співвідношення сторін траншеї, від пористості завантаження траншеї $p_{тр}$ та навколишнього ґрунту $p_{гр}$.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні методи гідравлічного розрахунку ексфільтраційних траншей базуються на досить істотних спрощеннях нестационарного процесу фільтрації води з траншеї при змінному напорі та площі фільтрації. На практиці широко використовується формула (1) для визначення площі ексфільтраційної траншеї [1], яка базується на припущеннях про наявність вільної фільтрації крізь дно та відсутності фільтрації крізь бічні стінки траншеї:

$$F_{\text{тр}} = \frac{W_{\text{ен}}}{p_{\text{тр}} k_{\text{ф}} t_{\text{сп}}}, \quad (1)$$

де $W_{\text{ен}}$ – об'єм дощового стоку, який надходить у траншею; $p_{\text{тр}}$ – пористість завантаження траншеї, згідно [1] приймається, як правило, рівною 0,4; $k_{\text{ф}}$ – коефіцієнт фільтрації ґрунту; $t_{\text{сп}}$ – час спорожнення траншеї; згідно [1] приймається рівним 72 год.

Принциповим недоліком цього методу є також те, що площа ексфільтраційної траншеї визначається за нормативним часом спорожнення траншеї, а не за часом її наповнення.

В інженерному методі гідравлічного розрахунку ексфільтраційних траншей, яким користуються у США [2], висота траншеї враховується, але для спрощення приймається гіпотеза щодо вільної фільтрації як крізь дно, так і крізь стінки траншеї, та не враховується зміна напору фільтрації під час наповнення траншеї:

$$F_{\text{тр}} = \frac{W_{\text{ен}}}{p_{\text{тр}} H_{\text{тр}} + k_{\text{ф}} t_{\text{н}}}, \quad (2)$$

де $H_{\text{тр}}$ – глибина траншеї; $t_{\text{н}}$ – час наповнення траншеї; згідно [2] $t_{\text{н}}=2$ год. Достатньо довільним є припущення, що час наповнення траншеї є постійним і рівним 2 год. Проте, високою є імовірність, що інтенсивніші дощі меншої тривалості є більш небезпечними з точки зору підтоплення траншеї.

Мета роботи: розробка математичної моделі процесу наповнення ексфільтраційної траншеї в безрозмірних змінних при постійному притоці дощового стоку з урахуванням фізичних характеристик траншеї та навколишнього ґрунту, а також зміни в часі наповнення траншеї, площі фільтрації та напору ексфільтрації води з траншеї.

Математична модель наповнення ексфільтраційної траншеї в безрозмірних змінних. Розглянемо процес наповнення одношарової ексфільтраційної траншеї відкритого типу, призначеної для регулювання дощового стоку з урбанізованого басейна стоку. Траншея заповнена однорідним матеріалом з коефіцієнтом пористості $p_{\text{тр}}$, її загальна висота – $H_{\text{тр}}$ (рис. 1).

Рівняння матеріального балансу за елементарний проміжок часу dt :

$$Q_{\text{ен}} dt = p_{\text{тр}} \Omega_{\text{тр}} dh_{\text{тр}} + Q_{\text{екс}} dt, \quad (3)$$

де Q_{en} – витрата поверхневого стоку, що надходить до траншеї; $\Omega_{тр}$ – площа траншеї в плані; $dh_{тр}$ – збільшення наповнення траншеї за час dt ; $Q_{екс}$ – ексфільтраційна витрата.

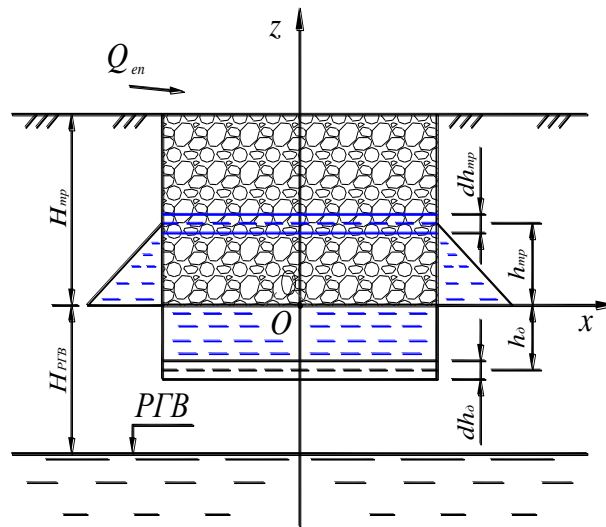


Рисунок 1 – Схема до виведення рівняння матеріального балансу води для ексфільтраційної траншеї

Об’ємна витрата води, що фільтрується з траншеї, дорівнює сумі витрат фільтраційного потоку крізь дно та крізь бічні стінки траншеї:

$$Q_{екс} = Q_{екс,д} + Q_{екс,ст} = k_{\phi} I_{д} \Omega_{тр} + k_{\phi} I_{ст} \Pi_{тр} h_{тр}, \quad (4)$$

де k_{ϕ} – коефіцієнт фільтрації ґрунту; $I_{д}$ та $I_{ст}$ – гідравлічний похил на виході з траншеї крізь дно та стінки відповідно; $\Pi_{тр}$ – периметр траншеї; $h_{тр}$ – глибина води в траншеї в момент часу t .

Запишемо диференціальне рівняння що описує притік води в траншею за час dt :

$$Q_{en} dt = \Pi_{тр} \Omega_{тр} dh_{тр} + (k_{\phi} I_{д} \Omega_{тр} + h_{тр} k_{\phi} \Pi_{тр}) dt. \quad (5)$$

Коефіцієнт фільтрації матеріалу завантаження набагато більший від коефіцієнта фільтрації навколишнього ґрунту. У такому випадку фільтраційний потік під дном траншеї завжди буде у напірному режимі течії. Якщо в момент часу t рівень води в ексфільтраційній траншеї становить $h_{тр}$, а глибина проникнення фронту фільтраційних вод під траншеєю – $h_{д}$ (рис. 1), то, нехтуючи боковим розтіканням призми фільтраційного потоку під дном траншеї, можна записати:

$$I_d = \frac{h_{тр} + h_d}{h_d} = \left(1 + \frac{h_{тр}}{h_d}\right). \quad (6)$$

Формула (6), дійсна при $h_d < H_{РГВ}$. При досягненні фільтраційним потоком рівня ґрунтових вод під траншеєю відбувається бічне розтікання фільтраційної призми. Гідравлічний похил фільтраційного потоку крізь дно траншеї при $h_d = H_{РГВ}$:

$$I_d = (1 + h_{тр} / H_{РГВ}), \quad (7)$$

де $H_{РГВ}$ – глибина рівня ґрунтових вод відносно дна ексфільтраційної траншеї (рис. 1). При незначній площі ексфільтраційної траншеї порівняно з загальною площею басейна стоку підняттям рівня ґрунтових вод під час випадання дощу та наповнення траншеї можна знехтувати, тобто приймати, що $H_{РГВ} = \text{const}$.

Враховуючи наявність незаповнених водою секторів з боків траншеї, припускаємо, що $I_{ст} = 1$ та отримуємо рівняння матеріального балансу води в траншеї у вигляді:

$$Q_{ен} dt = p_{тр} \Omega_{тр} dh_{тр} + k_{\phi} \left[\left(1 + \frac{h_{тр}}{h_d}\right) \Omega_{тр} + \Pi_{тр} h_{тр} \right] dt. \quad (8)$$

Елементарний об'єм води, що пройшов крізь дно траншеї за елементарний час dt , дорівнює збільшенню об'єму водонасиченого ґрунту під траншеєю:

$$k_{\phi} \left(1 + \frac{h_{тр}}{h_d}\right) \Omega_{тр} dt = p_{тр} \Omega_{тр} dh_d. \quad (9)$$

Отримали систему диференціальних рівнянь (8) і (9) з двома невідомими функціями $h_{тр}(t)$ і $h_d(t)$.

Таким чином, процес наповнення ексфільтраційної траншеї описується двома функціями $h_{тр}$ і h_d , які залежать від 8 параметрів, які характеризують притік дощового стоку до траншеї, конструктивні особливості траншеї та характеристики навколишнього ґрунту. Для узагальнення задачі перейдемо до безрозмірних змінних.

За лінійний масштаб візьмемо загальну висоту траншеї $H_{тр}$, тобто $O(h) = H_{тр}$. Тоді безрозмірне заповнення траншеї $h'_{тр} = h_{тр} / H_{тр}$; а безрозмірне водонасичення ґрунту під траншеєю: $h'_d = h_d / H_{тр}$.

Масштаб часу $O(t) = t_f$, де

$$t_f = p_{тр} \Omega_{тр} H_{тр} / Q_{ен}. \quad (10)$$

Тоді безрозмірний час:

$$t' = \frac{t}{t_f} = \frac{Q_{en} t}{p_{тр} \Omega_{тр} H_{тр}}, \quad (11)$$

звідки

$$dt' = \frac{Q_{en} dt}{p_{тр} \Omega_{тр} H_{тр}};$$

$$dt = \frac{p_{тр} \Omega_{тр} H_{тр}}{Q_{en}} dt'. \quad (12)$$

Рівняння (8) можна записати у вигляді:

$$p_{тр} \Omega_{тр} H_{тр} dt' = p_{тр} \Omega_{тр} dh_{тр} + k_{\phi} \left(1 + \frac{h_{тр}}{h_{д}} \right) \Omega_{тр} dt + k_{\phi} \Pi_{тр} h_{тр} dt.$$

У безрозмірному вигляді:

$$dt' = dh'_{тр} + \frac{k_{\phi} \Omega_{тр}}{Q_{en}} \left(1 + \frac{h'_{тр}}{h'_{д}} \right) dt' + \frac{k_{\phi} \Pi_{тр} h_{тр}}{Q_{en}} dt'; \quad (13)$$

$$dh'_{тр} = \left[1 - \frac{k_{\phi} \Omega_{тр}}{Q_{en}} \left(1 + \frac{h'_{тр}}{h'_{д}} \right) - \frac{k_{\phi} \Pi_{тр} H_{тр} h'_{тр}}{Q_{en}} \right] dt' ; \quad (14)$$

$$\frac{dh'_{тр}}{dt'} = \left(1 - \frac{k_{\phi} \Omega_{тр}}{Q_{en}} \left(1 + \frac{h'_{тр}}{h'_{д}} \right) - \frac{k_{\phi} \Pi_{тр} H_{тр} h'_{тр}}{Q_{en}} \right). \quad (15)$$

При $h_{д} = H_{РГВ}$, тобто при $h'_{д} = \frac{H_{РГВ}}{H_{тр}}$; $I_{д} = \left(1 + \frac{h_{тр}}{H_{РГВ}} \right)$, або в безрозмірному вигляді:

$$I_{д} = \left(1 + \frac{H_{тр} h'_{тр}}{H_{РГВ}} \right). \quad (16)$$

Функція $h'_{тр}$ змінюється від 0 до 1 при повному заповненні траншеї, а $h'_{д}$ – від 0 до $H_{РГВ}/H_{тр}$.

Приведемо до безрозмірного вигляду рівняння (9):

$$\frac{k_{\phi} \Omega_{тр} p_{тр}}{Q_{en}} \left(1 + \frac{h'_{тр}}{h'_{д}} \right) dt' = p_{тр} dh'_{д}. \quad (17)$$

Отже, отримали систему з двох рівнянь у безрозмірних величинах:

$$\frac{dh'_{тр}}{dt'} = 1 - \left(1 + \frac{h'_{тр}}{h'_{д}} \right) \cdot \frac{k_{\phi} \Omega_{тр}}{Q_{en}} - \frac{k_{\phi} \Pi_{тр} H_{тр} h'_{тр}}{Q_{en}}, \quad (18)$$

$$\frac{dh'_{д}}{dt'} = \frac{k_{\phi} \Omega_{тр} p_{тр} \left(1 + \frac{h'_{тр}}{h'_{д}} \right)}{p_{тр} Q_{en}}. \quad (19)$$

Введемо до розгляду два безрозмірних параметри A і $\Omega'_{ст}$:

$$A = k_{\phi} \Omega_{тр} / Q_{en}; \quad (20)$$

$$\Omega'_{\text{ст}} = \frac{\Omega_{\text{ст}}}{\Omega_{\text{тр}}} = \frac{\Pi_{\text{тр}} H_{\text{тр}}}{\Omega_{\text{тр}}} . \quad (21)$$

Тоді рівняння (18) і (19) запишуться відповідно у вигляді:

$$\frac{dh'_{\text{тр}}}{dt'} = 1 - A \cdot \left(1 + \frac{h'_{\text{тр}}}{h'_d} + \Omega'_{\text{ст}} h'_{\text{тр}} \right); \quad (22)$$

$$\frac{dh'_d}{dt'} = \frac{p_{\text{тр}} A}{p_{\text{тр}}} \left(1 + \frac{h'_{\text{тр}}}{h'_d} \right) , \quad (23)$$

де $h'_{\text{тр}}$, h'_d – шукані функції безрозмірного часу t' .

Всі безрозмірні параметри мають просту фізичну суть:

$$t_f = \frac{p_{\text{тр}} \Omega_{\text{тр}} H_{\text{тр}}}{Q_{\text{ен}}} - \text{час умовного наповнення траншеї при відсутності витoku з}$$

неї;

$A = k_{\phi} \Omega_{\text{тр}} / Q_{\text{ен}}$ – відношення об'ємної фільтраційної витрати крізь дно траншеї за умови вільного витікання (при $I_d=1$) до об'ємної витрати притоку в траншею;

$$\Omega'_{\text{ст}} = \frac{\Omega_{\text{ст}}}{\Omega_{\text{тр}}} - \text{відношення площі бічних стінок ексфільтраційної траншеї до}$$

площі її дна.

Розрахунок наповнення ексфільтраційної траншеї за методом кінцевих різниць. Для розв'язання системи рівнянь (22)–(23) застосуємо метод кінцевих різниць. Замінімо диференціали в рівняннях (22) і (23) через відповідні кінцеві різниці:

$$\Delta h'_{\text{тр}} = \left[1 - A \cdot \left(1 + \frac{h'_{\text{тр}}}{h'_d} + \Omega'_{\text{ст}} h'_{\text{тр}} \right) \right] \Delta t'; \quad (24)$$

$$\Delta h'_d = \left(1 + \frac{h'_{\text{тр}}}{h'_d} \right) \frac{p_{\text{тр}} A \Delta t'}{p_{\text{тр}}} . \quad (25)$$

Для підвищення точності чисельного розв'язку при визначенні приростів функцій $\Delta h'_{\text{тр}}$ та $\Delta h'_d$ за формулами (24)–(25) візьмемо поточні значення функцій $h'_{\text{тр}}$ і h'_d посередині розрахункових часових відрізків (рис. 2).

Тоді рівняння (24)–(25) запишуться у вигляді:

$$\Delta h'_{\text{тр},i} = \left[1 - A \cdot \left(1 + \frac{h'_{\text{тр},i} + \frac{\Delta h'_{\text{тр},i}}{2}}{h'_{d,i} + \frac{\Delta h'_{d,i}}{2}} + \Omega'_{\text{ст}} (h'_{\text{тр},i} + \Delta h'_{\text{тр},i}) \right) \right] \Delta t'; \quad (26)$$

$$\Delta h'_{д,i} = \left(1 + \frac{h'_{тр,i} + \frac{\Delta h'_{тр,i}}{2}}{h'_{д,i} + \frac{\Delta h'_{д,i}}{2}} \right) \frac{p_{тр} A \Delta t'}{P_{тр}}. \quad (27)$$

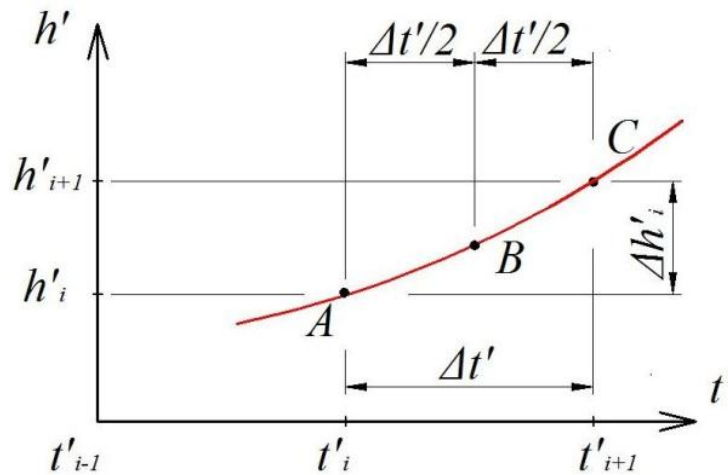


Рисунок 2 – Схема до пояснення визначення $\Delta h'_{тр}$ і $\Delta h'_{д}$ за методом кінцевих різниць

Отримали систему алгебраїчних рівнянь (26) і (27) з двома невідомими: $\Delta h'_{тр,i}$ і $\Delta h'_{д,i}$. З рівняння (27) отримуємо:

$$\left(\frac{p_{тр} \Delta h'_{д,i}}{p_{тр} A \Delta t'} - 1 \right) \cdot \left(h'_{д,i} + \frac{\Delta h'_{д,i}}{2} \right) = h'_{тр,i} + \frac{\Delta h'_{тр,i}}{2},$$

звідки можна отримати взаємозв'язок між $\Delta h'_{тр,i}$ та $\Delta h'_{д,i}$:

$$\Delta h'_{тр,i} = \left(\frac{p_{тр} \Delta h'_{д,i}}{p_{тр} A \Delta t'} - 1 \right) \cdot (2h'_{д,i} + \Delta h'_{д,i}) - 2h'_{тр,i}. \quad (28)$$

Для кожного значення безрозмірного часу t'_i за розробленою авторами програмою знаходили значення $\Delta h'_{тр,i}$ та $\Delta h'_{д,i}$, що задовольняють одночасно рівнянням (26) і (28). Далі обчислювали значення безрозмірних функцій $h'_{тр}$ та $h'_{д}$ в наступних вузлах безрозмірної часової сітки:

$$h'_{тр,i+1} = h'_{тр,i} + \Delta h'_{тр,i}; \quad (29)$$

$$h'_{д,i+1} = h'_{д,i} + \Delta h'_{д,i}. \quad (30)$$

Результати чисельного розрахунку наповнення ексфільтраційної траншеї в безрозмірних змінних. Чисельне моделювання процесу наповнення ексфільтраційної траншеї здійснювалося за умови постійного притоку дощових стічних вод до траншеї. Інтенсивність дощового стоку $q_{ст}$ розраховували за

методом граничних інтенсивностей за умови постійного в часі значення коефіцієнта стоку ψ_{mid} :

$$q_{\text{ен}} = \psi_{\text{mid}} q_{20} (20/t_d)^n, \quad (31)$$

де t_d – розрахунковий час випадання дощу, хв.; n – показник степеня, для рівнинних областей України при $P \geq 1$ рік $n=0,71$.

Розрахункова інтенсивність випадання дощу приймалася рівною $q_{20}=100$ л/(с·га), період одноразового перевищення розрахункової інтенсивності – $P=1$ рік.

У роботі виконано моделювання наповнення ексфільтраційної траншеї непроточного типу з рівномірним надходженням до неї усього поверхневого стоку з майданчика площею $F_{\text{бас}}=1000$ м² з водонепроникною поверхнею (при $\psi_{\text{mid}}=0,95$).

Пористість завантаження траншеї та навколишнього ґрунту прийнято рівними відповідно $r_{\text{тр}}=0,4$; $r_{\text{г}}=0,3$. Коефіцієнт фільтрації ґрунту приймався рівним $k_{\text{ф}}=5 \cdot 10^{-5}$ м/с = 180 мм/год як середнє значення для середньозернистих пісків.

Відносна площа ексфільтраційної траншеї x_F визначалася як відношення площі траншеї в плані до загальної площі басейна стоку:

$$x_F = \Omega_{\text{тр}} / F_{\text{бас}}. \quad (32)$$

На рис. 3 представлено типові залежності безрозмірного наповнення ексфільтраційної траншеї $h'_{\text{тр}}$ та безрозмірної глибини h'_d від безрозмірного часу $t'=t/t_f$ при розрахунковій тривалості дощу $t_d=120$ хв, що відповідає $t'_d=2,4$ (рис. 3,а) та при $t_d=20$ хв, що відповідає $t'_d=1,43$ (рис. 3,б). Відносна площа траншеї в плані прийнята рівною 2% відповідно до рекомендацій [1, 2, 4]. Співвідношення сторін траншеї $L_{\text{тр}}/B_{\text{тр}}=20$.

Як видно з графіка $h'_{\text{тр}}(t')$ на рис. 3,а, при розрахунковій тривалості дощу $t_d=120$ хв максимальне наповнення траншеї становить лише $0,491H_{\text{тр}}$, тоді як для коротшого, але інтенсивнішого дощу тривалістю $t_d=20$ хв $h'_{\text{тр,max}}=0,875$ (рис. 3,б). Для розглянутих умов дощ тривалістю 20 хв та, відповідно, з інтенсивністю 100 л/(с·га) є критичним, тобто спричиняє максимально можливе наповнення траншеї.

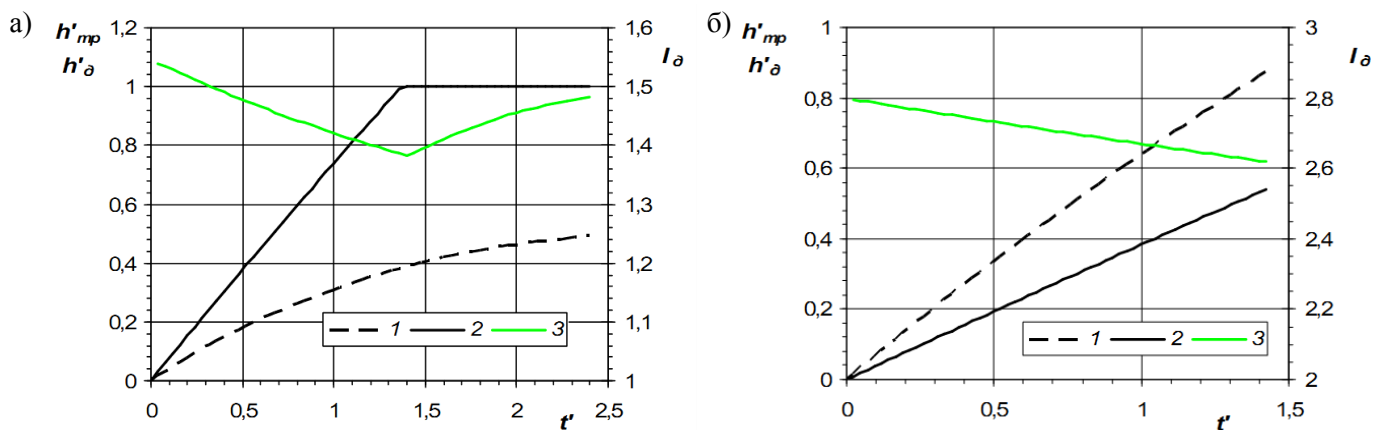


Рисунок 3 – Зміна в часі безрозмірної висоти наповнення ексфільтраційної траншеї $h'_{тр}$ (1); глибини ексфільтрації $h'_{д}$ (2) та гідравлічного похилу $I_{д}$ (3) при розрахунковій тривалості дощу $t_{д}=120$ хв; ($q_{20}=100$ л/(с·га); $F_{бас}=1000$ м²; $x_F=2\%$; $\psi_{mid}=0,95$; $k_{ф}=180$ мм/год; $p_{гр}=0,3$; $p_{тр}=0,4$; $H_{тр}=H_{РГВ}=1$ м; $L_{тр}/B_{тр}=20$)

Досліджено вплив розрахункової тривалості дощу та співвідношення сторін ексфільтраційної траншеї $L_{тр}/B_{тр}$ на її максимальне відносне наповнення $h'_{тр,маx}$ (рис. 4,а) та на максимальне відносне проникнення фільтраційного потоку під дно траншеї $h'_{д,маx}$ (рис. 4,а).

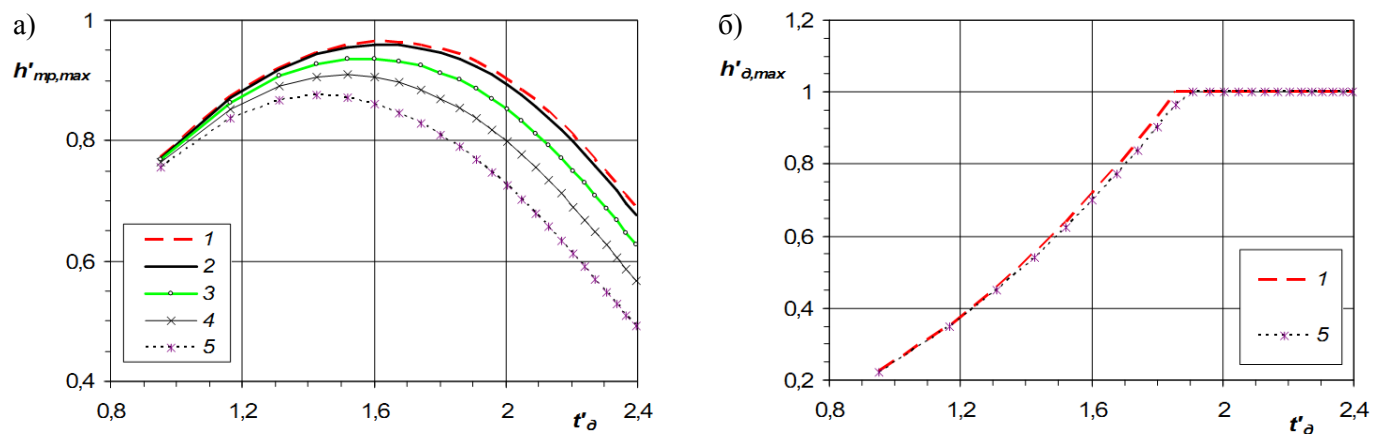


Рисунок 4 – Графіки залежності $h'_{тр,маx}$ та $h'_{д,маx}$ від безрозмірної тривалості дощу $t'_{д}$ при різних співвідношеннях $L_{тр}/B_{тр}$: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 5; 4 – 10; 5 – 20 ($q_{20}=100$ л/(с·га); $F_{бас}=1000$ м²; $x_F=2\%$; $\psi_{mid}=0,95$; $k_{ф}=180$ мм/год; $p_{гр}=0,3$; $p_{тр}=0,4$; $H_{тр}=H_{РГВ}=1$ м;)

Критична тривалість дощу, який спричиняє максимальне наповнення траншеї, знаходиться в межах від 20 до 30 хв (при $t'_{д}$ від 1,43 до 1,6), що значно менше за рекомендоване [2] значення $t_{д,кр}=120$ хв, причому зі збільшенням співвідношення $L_{тр}/B_{тр}$ значення $t_{д,кр}$ зменшується (рис. 4,а). Зі збільшенням

співвідношення довжини і ширини траншеї $L_{тр}/B_{тр}$ її максимальне наповнення при всіх інших однакових параметрах зменшується. У розглянутому випадку при зміні $L_{тр}/B_{тр}$ від 1 до 20 значення $h'_{тр,маx}$ зменшується відповідно від 0,965 до 0,875, що становить 9,3%. З іншого боку, конфігурація траншеї в плані практично не впливає на динаміку зміни максимальної відносної глибини $h'_{д,маx}$ (рис. 4,б). Значення $h'_{д,маx}$ залежить від відносного часу від моменту початку дощу та від фільтраційних характеристик ґрунту (k_f і $p_{гр}$).

Висновки

Розроблено нову математичну модель наповнення одношарової ексфільтраційної траншеї, призначеної для регулювання дощового стоку з урбанізованих територій. Отримано систему диференціальних рівнянь (8) і (9), які описують матеріальний баланс води в траншеї та ґрунті під дном траншеї. Цю систему рівнянь записано через безрозмірні змінні (рівняння (22) і (23)). З використанням методу кінцевих різниць розроблено комп'ютерну програму для чисельного розрахунку процесу наповнення ексфільтраційної траншеї. Отримано графічні залежності максимального наповнення ексфільтраційної траншеї, влаштованої в піщаних ґрунтах середньої крупності, від безрозмірної тривалості дощу та співвідношення довжини та ширини траншеї при постійному в часі притоці дощових стічних вод.

Література

1. Storm Water Management Planning and Design Manual. / Ministry of the Environment. — Ontario: Queen's Printer for Ontario, 2003.
2. Georgia stormwater management manual. Volume 2: Technical handbook. — Atlanta: AMEC Earth and Environmental, Center for Watershed Protection, 2001. — 844 p.
3. Kuo C.Y. A Study of Infiltration Trenches. / C.Y. Kuo, J.L. Zhu, L.A. Dollard . — Blacksburg: Virginia Water Resources Research Center, Virginia Polytechnic Institute and State University. — Bull. 163 — 1989. — 73 p.
4. Mays L. W. Stormwater collection systems design handbook [Текст] / L. W. Mays. — New York: McGraw-Hill Professional, 2001. — 1008 p.
5. Smith A.A. Miduss. Version 2. Appendices / A.A. Smith. — Dundas, Ontario. — 2004. — 89 p.
6. Rossman L. A. Storm Water Management Model. User's Manual. Version 5.0. EPA/600/R 05/040. [Текст] / L.A. Rossman. Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory. — Cincinnati. — 2007. — 265 p.